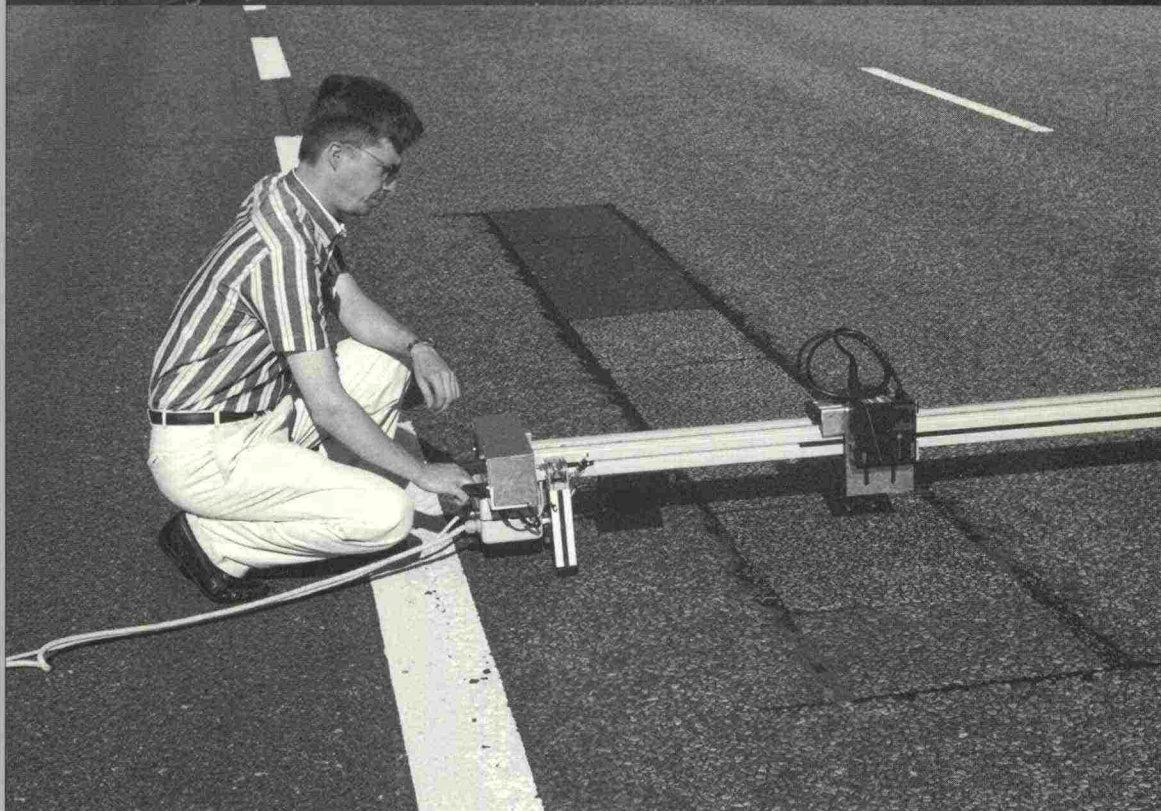
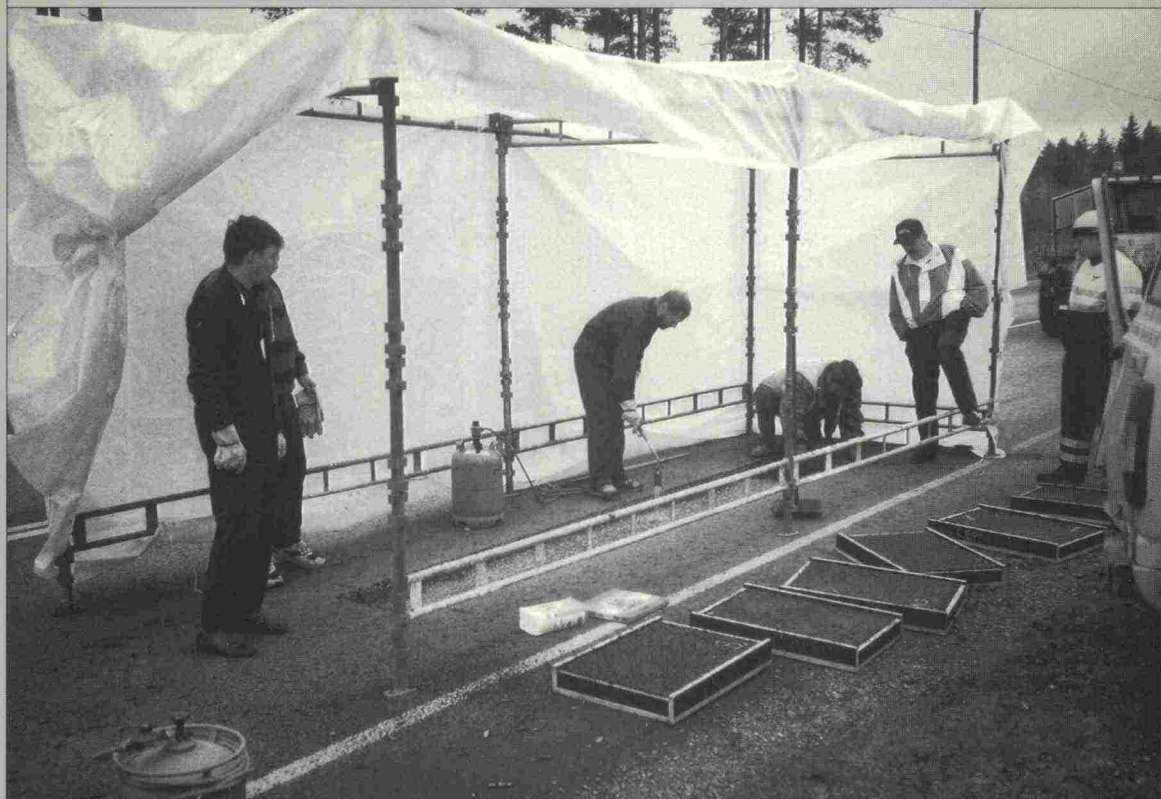


Vuorinen Jarmo, Kurki Timo, Alkio Risto

# Kiviaineksen raemuodon vaikutus SMA-päällysteen kulumiskestävyyteen

Loppuraportti Vt 1:n minikoeteiden tutkimuksista



Tielaitoksen  
selvityksiä  
37/1998

Helsinki 1998

TIEHALLINTO  
Tie- ja  
liikennetekniikka

Tielaitoksen selvityksiä  
37/1998

Vuorinen Jarmo, Kurki Timo, Alkio Risto

**Kiviaineksen raemuodon vaikutus  
SMA-päällysteen kulumiskestävyyteen**

Loppuraportti Vt 1:n minikoeteiden tutkimuksista

**Tielaitos  
TIEHALLINTO**

Helsinki 1998

ISSN0788-3722  
ISBN951-726-459-3  
TIEL 3200529

Oy Edita Ab  
Helsinki 1998

Julkaisua myy  
Tielaitos, painotuotepalvelut  
Telefax 0204 44 2652



**Tielaitos**  
TIEHALLINTO  
Tie- ja liikennetekniikka  
Opastinsilta 12 A  
PL 33  
00521 HELSINKI  
Puhelinvaihde 0204 44 150



## **TIIVISTELMÄ**

Raportissa on yhdistetty kahden erillisen minikoetietutkimuksen tulokset. Tutkimuksessa selvitettiin neljällä eri lujuuden omaavalla kiviaineksella raemuodon vaikutusta päällysteen kulumiskestävyyteen. Tutkittavat kiviainekset välpättiin kolmeen eri muotoluokkaan, jotka olivat ns. normaali (välppäämätön), hyvä ja huono raemuoto. Kiviainesten eri muotoluokista määritettiin kuulamylyarvot ja litteysluvat.

Kiviaineksista kaksi suhteitettiin SMA 18- ja kaksi SMA 20-massan rakeisuuskäyrän mukaiseksi. Kiviaineksen raemuodolla oli selvä vaikutus päällystemassan sideainetarpeeseen. Huonomuotoisten kiviainesten sideainetarve oli 0,7 - 1,1 %-yksikköä suurempi kuin saman kiven hyvämuotoisen kiviaineksen sideainetarve. Jokaisesta massasta tehtiin keinujyrällä optimisideainepitoisuudessa kaksi päällystelaattaa.

Minikoetie rakennettiin syksyllä 1995 Turun moottoritielle (Vt 1) Espoon ja Helsingin rajalle. Tiehen jyrstyttiin uriin asennettiin referenssimassoineen yhteensä 28 päällystelaattaa.

Talvien 1995 - 1996, 1996 - 1997 ja 1997 - 1998 aikana tapahtunut päällystelaattojen kulumisen mitattiin laser-profilometrillä. Yhtä kiveä lukuun ottamatta hyvämuotoisen kiviaineksen omaavat päällystelaatat kuluivat vähemmän kuin vastaavan kiven normaalimuotoista kiviainesta sisältävät laatat. Toisaalta kaikilla kivillä huonomuotoiset kiviainekset kuluivat enemmän kuin normaalimuotoiset kiviainekset.

Hyvämuotoista kiviainesta sisältävien päällystelaattojen kulumisen oli tutkituilla kivillä keskimäärin noin 5 % (0 - 11 %) vähäisempää kuin normaalimuotoista kiviainesta sisältävillä laatoilla. Minikoetien tulosten perusteella kiviaineksen muotoarvon parantamisella murskausteknisin keinoin on mahdollista vähentää SMA-päällysteen kulumista keskimäärin noin 10 % (5 - 15 %). Päällysteen kestoiässä tämä ero voi parhaimmillaan merkitä yhden vuoden eroa runsaasti liikennöidyillä teillä (KVL esim. 18 000) ja yhden tai kahden vuoden eroa vähemmän liikennöidyillä teillä (KVL esim. 7 500). Muotoarvon vaikutus päällysteen kulumiseen on kuitenkin kivikohtaista.

Kiviaineksen raemuodon vaikutus päällystemassan optimisideainepitoisuuteen oli huomattava. Tulosten perusteella kiviaineksen raemuodon parantamisella esimerkiksi kubisaattorilla voidaan vähentää sideaineen määrää keskimäärin noin 0,5 %-yksikköä (0,3 - 0,7 %) verrattuna tavanomaiseen kiviainekseen. Raemuodon parantaminen onkin useissa tapauksissa päällysteen kestoiän paranemisen ja vähäisemmän sideainetarpeen vuoksi taloudellisesti kannattavaa.

Kaikilla tutkituilla kivillä kuulamylyarvon kasvaessa myös päällysteen kulumisen kasvoi. Päällysteen kulumisen suuruus ei kuitenkaan ollut täysin tyydyttävästi ennustettavissa pelkästään kuulamylykokeella.



**Key words** mineral aggregate, flakiness, particle shape, asphalt, wear resistance, test road

## ABSTRACT

The aim of this research was to determine the effect of particle shape on the wear resistance of stone mastic asphalt (SMA) by using test slab method.

Four different kinds of mineral aggregates were sieved with bar sieves to produce 8 - 18 mm (two aggregates) or 8 - 20 mm (two aggregates) material of three particle shapes: good, normal and poor. Nordic abrasion values (studded tyre test) and flakiness values of these aggregates were measured.

The binder contents of different asphalt mixtures were determined based on the measurements of gyrator compactor. The difference between binder contents of aggregate mixtures with good and poor shape varied among 0,7 - 1,1 % units. 28 test slabs (50 x 70 cm) of asphalt concrete were rolled in the laboratory.

Test slabs were placed in the road on main road 1 on the border of Espoo and Helsinki. Before placing test slabs four 50 cm wide and 7 cm deep grooves were milled in the right-hand wheel rut. Test slabs were placed on a special paste and rolled in the same level as the surrounding wearing course.

Wear measurements of test slabs were taken using VTT's laser profilometer. According to the wear measurements of winters 1995 - 1996, 1996 - 1997 and 1997 - 1998 all test slabs of aggregates with poor shape wore more than test slabs of normal aggregates. On the other hand, test slabs of aggregates of good shape wore more than test slabs of normal aggregates. This was the case with the exception of one aggregate.

According to the results it is possible to improve the wear resistance of stone mastic asphalt by improving the particle shape of mineral aggregate. The improvement of asphalt wear is normally 5 - 15 %. This improvement means that the life time of asphalt can at its best be increased with one year on high traffic volume roads and with one or two years on low traffic volume roads. The effect of particle shape on the wear resistance of stone mastic asphalt is totally case-specific.

The effect of aggregate shape on the binder content of asphalt was significant. According to the results it is possible to reduce the binder content by 0,3 - 0,7 % units. Because of increased life time and lower binder content of asphalt it is in most cases economical to improve the particle shape.

The correlation between test slab wear and abrasion value was quite good. On the other hand, the prediction of asphalt wear resistance on account of abrasion value was not totally satisfactory.

## ALKUSANAT

Tutkimuksessa selvittiin neljällä kiviaineksella raemuodon vaikutusta päällysteen kulumiskestävyyteen minikoetiemenetelmällä. Raportissa on yhdistetty kahden erillisen minikoetietutkimuksen tulokset. Tutkimuksen tilaajana olivat Tielaitoksen tie- ja liikennetekniikka ja Lohja Rudus Oy. Tutkimusta valvoi tielaitoksen edustajana tieinsinööri *Mats Reihe* ja Lohja Rudus Oy:n edustajana kehityspäällikkö *Hanna Järvenpää*. Tutkimuksen vastuuhenkilöinä ovat projektin eri vaiheissa toimineet erikoistutkija *Risto Alkio* ja tutkija *Jarmo Vuorinen* Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen yhdyskuntatekniikan tutkimusyksiköstä. Minikoetien mittauksista ja mittaustulosten käsittelystä on vastannut VTT:n tutkija *Timo Kurki*. Raportin on laatinut *Jarmo Vuorinen*.

Helsingissä lokakuussa 1998

*Tielaitos*

*Tie- ja liikennetekniikka*

---

## SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	9
2	TUTKITTAVAT KIVIAINEKSET	10
3	LABORATORIOKOKKEET	11
3.1	Kuulamyly- ja muotoarvomääritykset	11
3.2	Massojen suhteitukset	14
3.3	Päällystelaattojen valmistus	15
4	MINIKOETIEN RAKENTAMINEN	16
5	MINIKOETIEN MITTAUKSET	17
6	TULOKSET	18
7	TULOSTEN TARKASTELU	24
8	JOHTOPÄÄTÖKSET	37
9	KIRJALLISUUS	39



## 1 JOHDANTO

Päällysteiden kulumistutkimuksia on perinteisesti tehty rakentamalla koeteitä, joissa on monia useiden satojen metrien mittaisia koeosuuksia. Koeteiden suurimpana ongelmana on ollut tutkittavan parametrin sekoittuminen muihin, vaikeasti kontrolloitaviin muuttujiin. Esimerkiksi kiviaineskoeteillä kiviainesominaisuuksien vaikutus päällysteen kulumiseen on voinut vääristyä päällysteen osuuksittain vaihtuvien muiden ominaisuuksien vuoksi. Täysimittaiset koetiet tarvitsevat lisäksi suuria määriä kiviaineksiä, joiden valmistaminen ja käsittely vaativat suuria kustannuksia ja erityistoimenpiteitä.

Minikoetien menetelmällä voidaan tutkia kontrolloidusti ja koeteiden rakentamiseen nähden hyvin halvalla päällysteen kulumista ja siihen vaikuttavia tekijöitä. Minikoetien menetelmässä tien reunauran kohdalle jyrskityihin kaukaloihin asetetaan laboratoriossa valmistettuja päällystelaattoja, joiden kulumista mitataan laser-profilometrillä. Rakennuskustannusten lisäksi minikoetien selvänä etuna koeteihin nähden on se, että päällystelaattojen koostumus eli kiviaineksen rakeisuus ja muoto-ominaisuudet sekä päällysteen sideainepitoisuus ovat hallinnassa ja tarkasti tiedossa. Koeosuuksien lyhyiden vuoksi tien geometrian ja liikenneolosuhteiden vaihtelut eivät myöskään pääse vaikuttamaan koetuloksiin. Minikoetien avulla voidaan myös tutkia muutoin vaikeasti hallittavia erityismateriaaleja ja -ratkaisuja.

Kyseinen minikoetietutkimus on ensimmäinen koesarja Suomessa. Vuonna 1996 minikoeteitä on rakennettu VTT:n toimesta Tielaitoksen Vaasan piiriin ja Mannerheimintielle Helsinkiin /1/. Viimeksi mainittuun kohteeseen rakennettiin minikoetie myös vuonna 1997 /2/. Vuonna 1998 minikoeteitä rakennettiin Kokkolaan (Tielaitos) ja Helsinkiin (Katurakenteet ja -päällysteet tutkimusohjelma). Päällystelaattojen lukumäärä kaikissa edellä mainituissa kohteissa on yhteensä noin 150. Minikoeteillä tutkitaan mm. kiviainesten lujuusominaisuuksien ja raemuodon sekä eri massatyypin (esim. SMA / AB, maksimiraekoko) vaikutusta päällysteen kulumiseen. Minikoeteiden rakentamista on kuvattu mm. Asfaltti- /3/ ja Tie ja liikenne-lehdissä /4/ sekä Päällystekursseilla 1998 /5/.

Tutkimuksessa selvitettiin neljällä kiviaineksella raemuodon vaikutusta päällysteen kulumiskestävytyteen minikoetien menetelmällä. Tarkoituksena oli myös saada kokemuksia minikoetien rakentamisesta ja siihen liittyvistä mahdollisista ongelmista. Tähän raporttiin on koottu kahden erillisen tutkimuksen tulokset. Minikoetien ensimmäisen talven tulokset on julkaistu Tielaitoksen kahden kiviaineksen osalta Tielaitoksen selvityksessä 57/1996 /6/ ja kahden talven tulokset Tielaitoksen selvityksessä 34/1997 /7/. Lohja Rudus Oy:n minikoetien ensimmäisen talven tulokset on julkaistu VTT:n tutkimusraportissa 353/1996 /8/.

## 2 TUTKITTAVAT KIVIAINEKSET

Tutkittavana oli neljä kalliomursketta, jotka olivat:

1. Teiskon granodioriitti
2. Varpaisjärven diabaasi
3. Inkoon graniitti ja
4. Koski TL:n vulkaniitti

Kaikki kiviainekset edustivat jälkimurskaimen tuotetta. VTT hankki Teiskon ja Varpaisjärven kiviainekset, jotka seulottiin lajitteisiin 8 - 12, 12 - 16 ja 16 - 18 mm. Lajitteista välpättiin tutkimukseen tarvittavat kiviaineserät. Toiseen minikoetietutkimukseen Lohja Rudus Oy toimitti Inkoon ja Kosken kiviainekset VTT:lle lajitteissa 8 - 12, 12 - 16 ja 16 - 20 mm. Lajitteiden 8 - 12 ja 16 - 20 mm välppäyksen suoritti Lohja Rudus Oy ja lajitteen 12 - 16 mm välppäyksen VTT.

Jokaisen lajitteen kiviainekset jaettiin kolmeen eri muotoluokkaan. Perusmateriaalina oli normaalimuotoinen kiviaines, jolla tarkoitetaan murskauksessa syntynyttä, kokeissa sellaisenaan käytettyä kiviainesta. Kaksi muuta muotoluokkaa olivat ns. hyvän ja huonon muotoarvon omaavat kiviainekset. Nämä saatiin välppäämällä perusmateriaalia. Lajite 8 - 12 mm välpättiin 8 mm:n välppäseulalla, 12 - 16 mm:n lajite 11,2 mm:n välpällä ja 16 - 18 / 16 - 20 mm:n lajite 12,5 mm:n välpällä. Välppien päälle jääneet ainekset yhdistettiin hyvämuotoiseksi kiviainekseksi ja välppien läpäisseet ainekset huonomuotoiseksi kiviainekseksi.

Referenssimassan kiviaineksena käytettiin Teiskon hyvämuotoista kiviainesta, jonka karkeimpana lajitteena oli 16 - 20 mm. Referenssimassalla pyrittiin varmistamaan kahden erillisen minikoetien tulosten keskinäinen vertailtavuus.



### 3 LABORATORIOKokeet

#### 3.1 Kuulamyly- ja muotoarvomääritykset

Kiviaineksista määritettiin kuulamylyarvot ja litteysluvut. Kuulamylykokeet tehtiin jokaisesta kolmesta muotoluokasta tuotetestinä PANK-menetelmällä 2208. Lisäksi välppäämättömästä, normaalimuotoisesta kiviaineksesta tehtiin kuulamylykoe raaka-ainetestinä PANK-menetelmällä 2207. Litteyslukumääritykset tehtiin välppäämällä menetelmän PANK 2203 (SFS-EN 933-3) mukaisesti, minkä lisäksi Teiskon ja Varpaisjärven kivillä liuskeisuus ja puikkoisuus määritettiin työntötulkimittauksin menetelmän TIE 233 mukaisesti lajitteesta 12 - 16 mm. Teiskon ja Varpaisjärven kiviainesten maksimiraekoko oli 18 mm, joten lajitteen 12,5 - 20 mm litteysluvut on määritetty lajitteesta 12,5 - 18 mm.

Kuulamyly- ja muotoarvomääritysten tulokset esitetään taulukossa 1.

Teiskon kiviaineksen kuulamylyarvot vaihtelivat hyvämuotoisen 9,5 %:sta huonomuotoisen 13,7 %:iin. Raaka-ainetestin tulos 10,6 % edusti Asfalttinormien 1995 mukaista lujuusluokkaa III.

Litteysluvut (ent. liuskeisuusarvot) olivat 8 - 12,5 mm lajitteella välillä 0,0 - 17,0 % ja 12,5 - 18 mm lajitteella 0,0 - 19,6 %. Huonomuotoinen kiviaines edusti siis Asfalttinormien muotoluokkaa III. Normaali- ja hyvämuotoinen kiviaines kuuluivat puolestaan muotoluokkaan I. Lajitteen 12 - 16 mm työntötulkilla määritetyt liuskeisuusarvot vaihtelivat muotoluokittain välillä 1,23 - 1,77 ja puikkoisuusarvot välillä 1,68 - 2,33.

Varpaisjärven kiviaineksella raemuodon vaikutus kuulamylyarvoihin oli selvästi vähäisempi kuin Teiskon kiviaineksella eli 6,3 %:sta 7,5 %:iin. Raaka-ainetestin tulos 6,7 % edusti Asfalttinormien 1995 mukaista lujuusluokkaa I.

Litteysluvut vaihtelivat muotoluokittain välillä 0,0 - 25,4 % (8 - 12,5 mm) ja 0,0 - 29,0 % (12,5 - 18 mm). Asfalttinormien 1995 mukaan huonomuotoisin kiviaines oli muotoluokkaa III. Erityisen huomioitavaa oli karkeimman lajitteen 16 - 18 mm huono raemuoto. Erikseen tälle lajitteelle laskettu litteysluku oli 42,0 %. Huonoon arvoon tosin vaikutti osaltaan se, että lajitteen maksimiraekoko oli 18 mm ja välppäaukon leveys menetelmän mukaisesti 10 mm. Myös normaalimuotoinen kiviaines edusti Teiskon kiviaineksesta selvästi poiketen muotoluokkaa III. Hyvämuotoisen kiviaineksen muotoluokka oli I. Lajitteen 12 - 16 mm työntötulkilla määritetyt liuskeisuusarvot vaihtelivat muotoluokittain välillä 1,27 - 1,83 ja puikkoisuusarvot välillä 1,73 - 2,61.

Inkoon kivellä kuulamylyarvot vaihtelivat hyvämuotoisen 7,4 %:sta huonomuotoisen 9,0 %:in. Raaka-ainetestin tulos 7,7 % edusti Asfalttinormien 1995 mukaista lujuusluokkaa II.

Litteysluvut olivat 8 - 12,5 mm lajitteella vastaavasti välillä 0,2 - 18,2 % ja 12,5 - 20 mm lajitteella 0,0 - 15,2 %. Huonomuotoinen kiviaines edusti siis muotoluokkaa III. Normaali- ja hyvämuotoinen kiviaines kuuluivat puolestaan muotoluokkaan I.



Kosken kivellä raemuodon vaikutus kuulamylyarvoihin oli paljon pienempi eli 6,7 %:sta 7,0 %:in. Raaka-ainetestin tulos 6,1 edusti Asfalttinormien 1995 mukaista lujuusluokkaa I.

Litteysluvut vaihtelivat muotoluokittain välillä 0,2 - 20,2 % (8 - 12,5 mm) ja 0,0 - 23,4 % (12,5 - 20 mm). Asfalttinormien mukaan huonomuotoisin kiviaines oli muotoluokkaa III, normaalimuotoinen kiviaines luokkaa II ja hyvämuotoinen kiviaines luokkaa I. Erityisen huomioitavaa Kosken huonomuotoisella kiviaineksella oli karkeimman lajitteen 16 - 20 mm huono raemuoto. Erikseen tälle lajitteelle laskettu litteysluku oli 35,8 %.

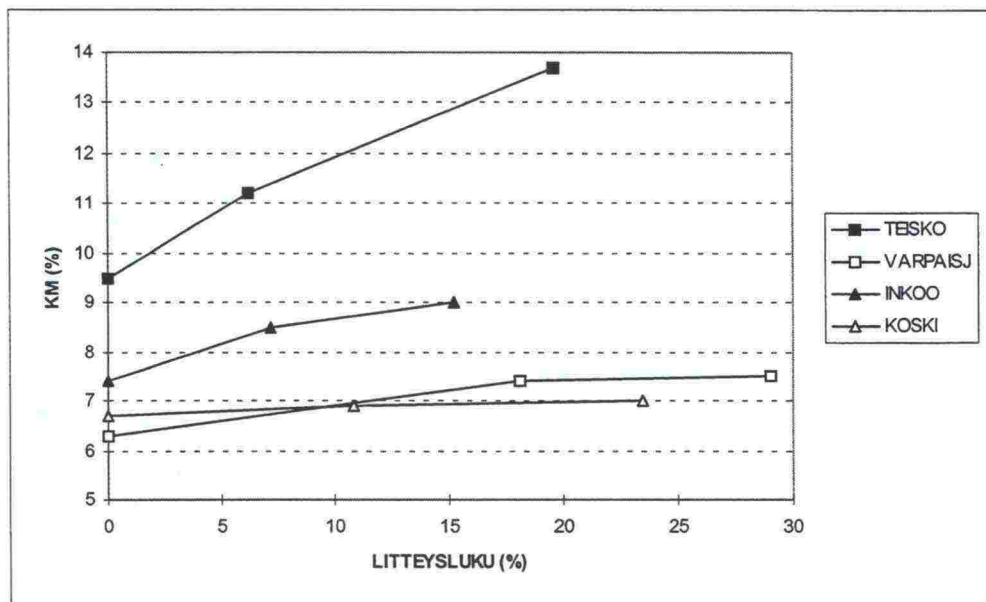
Kaikkien neljän kiven jokaisesta muotoluokasta on tehty vain yksi kuulamylymääritys lukuun ottamatta Varpaisjärven kiven normaali- ja huonomuotoisia kiviaineksia, joista tehtiin lukuarvojen samankaltaisuuden vuoksi kaksi rinnakkaismääritystä. Viimeksi mainituilla kiviaineksilla taulukon 1 kuulamylyarvot ovat kahden määrityksen keskiarvoja.

*Taulukko 1. Tutkittavien kiviainesten kuulamyly- ja muotoarvot.*

Kivi	Muoto	Kuulamylyarvo %		Litteysluku %		Muotoarvo 12 - 16 mm	
		Tuote- testi	Raaka- aine	8-12,5 mm	12,5- 20 mm*	Liusk. b/a	Puik. c/a
TEISKO	hyvä	9,5	-	0,0	0,0	1,23	1,68
	norm.	11,2	10,6	9,5	6,2	1,55	2,05
	huono	13,7	-	17,0	19,6	1,77	2,33
VARP. JÄRVI	hyvä	6,3	-	0,0	0,0	1,27	1,73
	norm.	7,4	6,7	19,7	18,1	1,64	2,34
	huono	7,5	-	25,4	29,0	1,83	2,61
INKOO	hyvä	7,4	-	0,2	0,0	-	-
	norm.	8,5	7,7	10,6	7,2	-	-
	huono	9,0	-	18,2	15,2	-	-
KOSKI	hyvä	6,7	-	0,2	0,0	-	-
	norm.	6,9	6,1	16,6	10,8	-	-
	huono	7,0	-	20,2	23,4	-	-

\* = Teiskon ja Varpaisjärven kivillä 12,5 - 18 mm

Kuvassa 1 esitetään kiviainesten tuotetestinä tehtyjen kuulamylyarvojen riippuvuus lajitteen 12,5 - 18 mm (Teisko ja Varpaisjärvi) / 12,5 - 20 mm (Inkoo ja Koski) litteysluvusta.



Kuva 1. Kiviainesten kuulamylyarvot (tuotetestit) litteysluvun (12,5 - 18 / 20 mm) funktiona.

Kuulamyly- ja muotoarvojen lisäksi kiviaineksista on määritetty niiden kiintotiheys vedessä punnitsemalla PANK-menetelmällä 2107. Teiskon kivellä kiintotiheys oli 2,68 g/cm<sup>3</sup>, Varpaisjärven kivellä 3,05 g/cm<sup>3</sup>, Inkoon kivellä 2,65 g/cm<sup>3</sup> ja Kosken kivellä 2,86 g/cm<sup>3</sup>.

Kivistä ei ole tämän tutkimuksen yhteydessä määritetty pistekuormitusindeksiä. ASTO-projektin tulosten mukaan Teiskon kiven pistekuormitusindeksi on 9,8 MPa ja Varpaisjärven kiven 14,9 MPa. Lohja Rudus Oy:n ilmoituksen mukaan Inkoon kiven pistekuormitusindeksi on vuosien 1994 ja 1995 keskiarvotuloksena 11,1 MPa ja Kosken kiven 14,9 MPa.

### 3.2 Massojen suhteitukset

Tutkimuksessa käytetty massatyyppi oli Teiskon ja Varpaisjärven kivillä SMA 18, jonka yli 8 mm:n kiviaineksena oli tutkittava kiviaines. Inkoon ja Kosken kivillä massana oli SMA 20. Suhteituksen karkearakeiset lajitteet olivat 8 - 12, 12 - 16 ja 16 - 18 / 16 - 20 mm. Kaikissa massoissa alle 8 mm:n materiaalina oli Teiskon kiviaines (0 - 3 ja 0 - 6 mm), minkä lisäksi massoissa käytettiin kalkkikivijauhetta. Täytejauhepitoisuudet olivat Varpaisjärven kivellä 11 % ja muilla kivillä 12 %.

Tutkittavista kiviaineksista suhteitetut rakeisuuskäyrät on esitetty aiemmissa raporteissa /6, 7, 8/. Kiviainesten 12 mm läpäisyarvot olivat 46 - 48 % ja 16 mm läpäisyarvot 81 - 82 %. SMA 18- ja SMA 20-massat poikkisivat toisistaan vain yli 16 mm aineksen suhteen.

Massojen sideainepitoisuuksien määrittämiseksi SMA-massoista tehtiin ICT-kiertotiivistyskokeet. Kokeessa sylinterissä olevaa massaa tiivistetään pyörivässä liikkeessä olevan männän avulla. Kokeen tuloksena saadaan koekappaleen tilavuussuhteet ja tiivistämiseen tarvittava voima eli leikkausjännitys kN/m<sup>2</sup>.

Massojen sideaineena käytettiin bitumia B70/100 ja lisäaineena 0,4 % Arbocel-selluloosakuitua. Massat tehtiin kappaleessa 2 mainituilla karkearakeisen kiviaineksen eri muotoluokilla: hyvä, normaali ja huono raemuoto. Jokaisella massalla tiivistyskoe tehtiin kolmella eri sideainepitoisuudella. Lähtösideainepitoisuudet valittiin aikaisempien kokeiden ja suhteitusten perusteella. Tiivistetyistä näytteistä määritettiin massan tiheys (PANK-4108), päällysteen tiheys (PANK-4110), tyhjätila, kiviaineksen tyhjätila ja sideaineen täyttöaste (PANK-4114). Määritykset tehtiin kolmella rinnakkaisnäytteellä / massa.

Sideaineen täyttöastetavoitteena oli noin 80 %, johon arvoon päästiin lukuun ottamatta Varpaisjärven, Inkoon ja Kosken huonomuotoisia kiviaineksiä. Tulosten perusteella massojen optimisideainepitoisuuksiksi valittiin taulukossa 2 esitetyt arvot. Sideainetarve vaihteli kiviaineksen muotoarvosta riippuen Teiskon kivellä välillä 5,7 - 6,6 %, Varpaisjärven kivellä välillä 5,5 - 6,2 %, Inkoon kivellä välillä 6,1 - 6,9 % ja Kosken kivellä välillä 5,7 - 6,8 %. Taulukossa 2 esitetään lisäksi kunkin massan optimisideainepitoisuutta vastaavat tyhjätilat, kiviaineksen tyhjätilat ja täyttöasteet. Aiemmissa, ensimmäisen talven kulumista kuvaavissa raporteissa esitettiin kuvina eri massoilla eri sideainepitoisuuksilla saadut tyhjätilat, kiviaineksen tyhjätilat ja täyttöasteet.



*Taulukko 2. Tutkittujen massojen optimisideainepitoisuudet (SA) ja niitä vastaavat tyhjätilat (TYTI), kiviaineksen tyhjätilat (KAT) ja täyttöasteet (TA).*

Kiviaines	Muoto	SA %	TYTI %	KAT %	TA %
TEISKO	Hyvä	5,7	3,1	16,4	81
	Normaali	6,1	3,3	17,5	81
	Huono	6,6	3,8	18,8	80
VARPAISJ.	Hyvä	5,5	3,4	17,3	81
	Normaali	5,9	3,8	18,5	79
	Huono	6,2	4,7	19,9	77
INKOO	Hyvä	6,1	3,4	17,5	81
	Normaali	6,8	3,8	19,4	80
	Huono	6,9	4,6	20,2	78
KOSKI	Hyvä	5,7	3,5	17,3	80
	Normaali	6,3	3,8	18,9	80
	Huono	6,8	4,9	20,9	77

Tilavuussuhteituksen perusteella voidaan todeta, että huonon muotoarvon omaavat kiviainekset ovat vaikeammin tiivistettäviä kuin vastaavan sideainepitoisuuden omaavat normaali- ja hyvämuotoiset kiviainekset. ICT-kokeen yksittäiset tulokset (tiheys ja leikkausvoima tiivistyskierrosten suhteen) on esitetty Teiskon ja Varpaisjärven kivien osalta Tielaitoksen vuoden 1996 raportissa /6/ ja Inkoon ja Kosken kivien osalta VTT:n tutkimusraportissa /8/.

### 3.3 Päälystelaattojen valmistus

Minikoetielle asetetut päälystelaatat (50 x 70 x 6 cm) valmistettiin sekoittamalla massat laboratoriosekoittimessa, minkä jälkeen ne tiivistettiin keinujuurällä muotteihin. Tiivistyksessä käytetty massan lämpötila oli 155 °C. Eri massojen koostumukset olivat rakeisuudeltaan ja sideainepitoisuudeltaan kappaleessa 3.2 esitettyjen koostumusten mukaisia.

## 4 MINIKOETIEN RAKENTAMINEN

Minikoetie rakennettiin 21.9.1995 Turun moottoritielle (Vt 1) Kehä I:ltä Helsingin suuntaan vievälle oikeanpuoleiselle ajokaistalle aivan Espoon ja Helsingin rajalle. Tieosuuden keskivuorokausiliikenne (KVL) on noin 27 500.

Tiehen jyrssiin ajosuunnassa neljä 50 cm levyistä, 7 cm syvää ja 7 m pitkää uraa oikeanpuoleisen ajouran kohdalle. Täytemassan tasauksen jälkeen laboratoriossa valmistetut päällystelaatat (50 x 70 x 6 cm) asetettiin jyrshintäuraan siten, että niiden tasaisempi ja sideainerikkaampi alapinta tuli ylöspäin. Laatat jyrättiin tienpinnan tasoon ja lopuksi laattojen saumat täytettiin bitumilla.

Päällystelaatat asennettiin minikoetiele siten, että kaikista tutkituista SMA 18- ja SMA 20-massoista sekä vertailumassasta oli kaksi laattaa eli laattojen yhteismäärä oli 28. Ajosuunnan mukaan laatat, jotka sijaitsevat saman ajokaistan peräkkäisissä jyrshintäurissa (osuudet 1 - 4), on asetettu seuraavasti (VARP. = Varpaisjärven kiviaines):

### Osuus 1, ajosuunta --->

VARP.	VARP.	VARP.	TEISKO	TEISKO	TEISKO	TEISKO
HYVÄ	NORM.	HUONO	REFER.	HYVÄ	NORM.	HUONO

### Osuus 2, ajosuunta --->

TEISKO	TEISKO	TEISKO	TEISKO	VARP.	VARP.	VARP.
HUONO	NORM.	HYVÄ	REFER.	HUONO	NORM.	HYVÄ

### Osuus 3, ajosuunta --->

KOSKI	KOSKI	KOSKI	TEISKO	INKOO	INKOO	INKOO
HYVÄ	NORM.	HUONO	REFER.	HYVÄ	NORM.	HUONO

### Osuus 4, ajosuunta --->

INKOO	INKOO	INKOO	TEISKO	KOSKI	KOSKI	KOSKI
HUONO	NORM.	HYVÄ	REFER.	HUONO	NORM.	HYVÄ

## 5 MINIKOETIEN MITTAUKSET

Minikoetien mittaukset tehtiin tarkoitukseen erityisesti suunnitellulla laser-profilometrillä, jonka mittausvälinä käytettiin 2 mm:ä. Mittausten kiintopisteinä käytettiin laattojen molemmille sivuille asennettuja pultteja, joiden yläpinta oli 0,5 - 1 cm tienpintaa alempana. Mittausten avulla määritettiin päällystelaattojen kulumisen poikkiprofiilien muutoksena. Jokaisen päällystelaatan kulumisen mitattiin viidestä eri profiilista keskeltä laattaa 40 cm:n matkalta keskimääräisinä kulumisarvoina (mm).

Ensimmäiset mittaukset tehtiin 11.12.1995 ja toiset mittaukset nastarengaskauden päätyttyä 8.5.1996. Ensimmäiset mittaukset tehtiin joulukuussa jotta liikenne ehtisi kuluttaa päällystelaattojen ylimääräisen mastiksin pois. Seuraavat mittaukset tehtiin 31.10.1996 ja 22.5.1997. Kevään 1997 mittaukset tehtiin pidentyneen nastarengaskauden vuoksi noin kaksi viikkoa myöhemmin kuin keväällä 1996. Viimeiset mittaukset tehtiin 29.10.1997 ja 13.5.1998.

Edellä mainitut mittausajankohdat koskevat Teiskon ja Varpaisjärven kivien minikoetielaattoja, sillä Inkoon ja Kosken kivien laatat on mitattu vain 11.12.1995, 8.5.1996 ja 13.5.1998. Tämän vuoksi viimeksi mainittuja kiviä sisältävien päällystelaattojen viimeisimmät mittautulokset (kevään 1996 ja kevään 1998 mittausprofiilien erotus) sisältävät kahden talven ja kahden kesän yhteenlasketut tulokset. Kahden viimeisen talven yhteenlaskettu päällysteen kuluminen on saatu vähentämällä tuloksista arvioitu kahden kesän poikkiprofiilin muutos. Arvio perustuu Teiskon ja Varpaisjärven kivillä saatuihin tuloksiin.



## 6 TULOKSET

Talvien 1995 - 1996, 1996 - 1997 ja 1997 - 1998 SMA-päälysteen kulumista kuvaavat profiilikohtaiset arvot sekä niistä lasketut laattakohtaiset keskiarvot ja keskihajonnat esitetään liitteessä 1, jossa on esitetty myös kaikkien kolmen talven yhteenlasketut kulumisarvot. Liitteen 1 profiilikohtaiset kulumistulokset esitetään yhden desimaalin tarkkuudella, vaikka laattakohtaisen keskiarvotuloksen laskennassa näitä tuloksia on käsitelty kahden desimaalin tarkkuudella.

Taulukossa 3 esitetään minikoetien päälystelaattojen kulumistulokset massakohtaisesti kahden rinnakkaislaatan keskiarvona. Kesien 1996 ja 1997 arvot ovat summa päälysteen tiivistymisestä, deformatumisesta ja vähäisestä kulumisesta. Kosken ja Inkoon kiviä sisältävien päälystelaattojen talvien 1996 - 1997 ja 1997 - 1998 yhteenlaskettu kuluminen on saatu vähentämällä mittaustuloksista (kevät 1996 ja kevät 1998) Teiskon ja Varpaisjärven kiviä sisältävien laattojen kahden kesän yhteenlaskettu keskimääräinen profiilimuutos (kesä 1996 0,15 mm + kesä 1997 0,30 mm = 0,45 mm).

Taulukossa 4 esitetään päälystemassojen kolmen talven yhteenlasketut kulumisarvot korjattuna referenssimassojen kulumisarvoilla. Korjattu arvo on saatu kertomalla laatan kulumisarvo referenssimassojen keskiarvon ja kyseisen osuuden referenssimassan arvon suhteella ja laskemalla näistä tuloksista massakohtainen keskiarvo.

*Taulukko 3. Minikoetien päälystelaattojen talvien 1995 - 1996, 1996 - 1997 ja 1997 - 1998 sekä kesien 1996 ja 1997 aikana tapahtunut massakohtainen kuluminen (mm). Viimeisessä sarakkeessa on kolmen talven yhteenlaskettu kuluminen. T = talvi ja K = kesä.*

KIVI	MUOTO	T 95-96	K 96	T 96-97	T 95-97 YHT.	K 97	T 97-98	T 96-98 YHT.	T 95-98 YHT.
Varp	Hyvä	2,00	0,21	3,49	5,49	0,21	4,14	7,63	9,63
Varp	Norm.	2,05	0,09	3,67	5,72	0,27	4,29	7,96	10,01
Varp	Huono	2,57	0,21	4,96	7,53	0,42	5,61	10,57	13,14
Teis	Refer.	2,96	0,14	5,65	8,61	0,35	6,57	12,22	15,18
Teis	Hyvä	2,75	0,08	5,66	8,41	0,29	6,61	12,27	15,02
Teis	Norm.	3,01	0,15	6,03	9,04	0,30	6,96	12,99	16,00
Teis	Huono	3,58	0,18	6,27	9,85	0,26	6,77	13,04	16,62
Kos	Hyvä	1,87	-	-	-	-	-	5,83	7,70
Kos	Norm.	2,02	-	-	-	-	-	6,64	8,66
Kos	Huono	2,18	-	-	-	-	-	7,96	10,14
Teis	Refer.	2,94	-	-	-	-	-	12,03	14,97
Ink	Hyvä	2,56	-	-	-	-	-	10,41	12,97
Ink	Norm.	2,64	-	-	-	-	-	10,30	12,94
Ink	Huono	3,22	-	-	-	-	-	10,97	14,19

*Taulukko 4. Minikoetien päällystelaattojen talvien 1995 - 1998 aikana tapahtunut massakohtainen kuluminen (mm) korjattuna referenssimassojen kulumisarvoilla.*

KIVI	MUOTO	TALVET 95-98 YHTEENSÄ		
		LAATTA1	LAATTA2	KA
Varpaisjärvi	Hyvä	9,60	9,52	9,56
Varpaisjärvi	Normaali	10,87	9,12	10,00
Varpaisjärvi	Huono	13,92	12,27	13,10
Teisko	Hyvä	16,21	13,77	14,99
Teisko	Normaali	16,41	15,42	15,92
Teisko	Huono	17,82	15,35	16,59
Koski	Hyvä	7,79	7,70	7,75
Koski	Normaali	8,99	8,47	8,73
Koski	Huono	9,42	10,92	10,17
Inkoo	Hyvä	13,90	12,31	13,11
Inkoo	Normaali	13,24	12,85	13,05
Inkoo	Huono	16,83	12,02	14,43

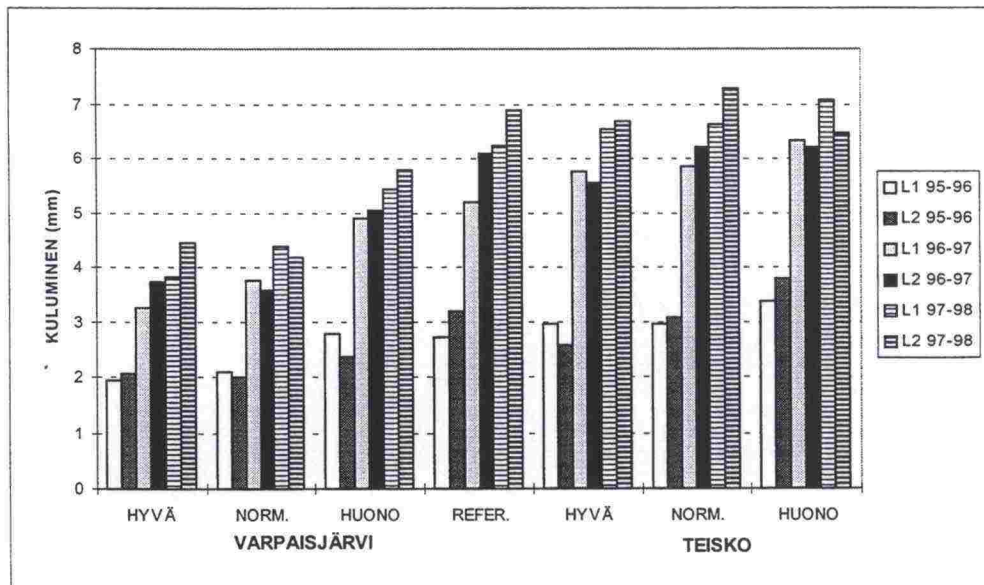
Minikoetieltä mitatut talven 1995 - 1996 laattakohtaiset kulumisarvot vaihtelivat välillä 1,75 - 3,79 mm (kaikki kivet), talven 1996 - 1997 kulumisarvot välillä 3,26 - 6,33 mm (Teiskon ja Varpaisjärven kivet) ja talven 1997- 1998 arvot välillä 3,83 - 7,27 mm (Teiskon ja Varpaisjärven kivet) (taulukko 3). Kuten kuvat 2 - 4 osoittavat eri massojen rinnakkaislaattojen keskinäiset kulumaserot eivät olleet muutamaa poikkeusta (Teiskon referenssikiviainekset sekä Inkoon ja Kosken huonomuotoiset kiviainekset) lukuun ottamatta kovin suuria. Mikäli saman massan kahden rinnakkaislaatan kuluminen on ollut suuruusluokaltaan toisistaan poikkeavaa, saman laatan kuluminen on ollut pääosin joka talvi suurempaa kuin toisen laatan kuluminen.

Mikäli tuloksia tarkastellaan kahden rinnakkaislaatan arvojen keskiarvona, kulumisarvot ovat talven 1995 - 1996 osalta 1,87 - 3,58 mm, talven 1996 - 1997 osalta 3,49 - 6,27 mm ja talven 1997 - 1998 osalta 4,14 - 6,96 mm (kuvat 5 ja 6). Kaksi viimeistä vaihteluväliä koskevat vain Teiskon ja Varpaisjärven kiviä. Millimetreinä ilmoitetut kulumisarvot ovat siis keskiarvotuloksia keskeltä laattaa 40 cm matkalta. Kulumisarvoja ei voi suoraan muuttaa urasyvyyksiksi, mutta lukuarvoltaan ne ovat jonkin verran urasyvyyspienempiä.

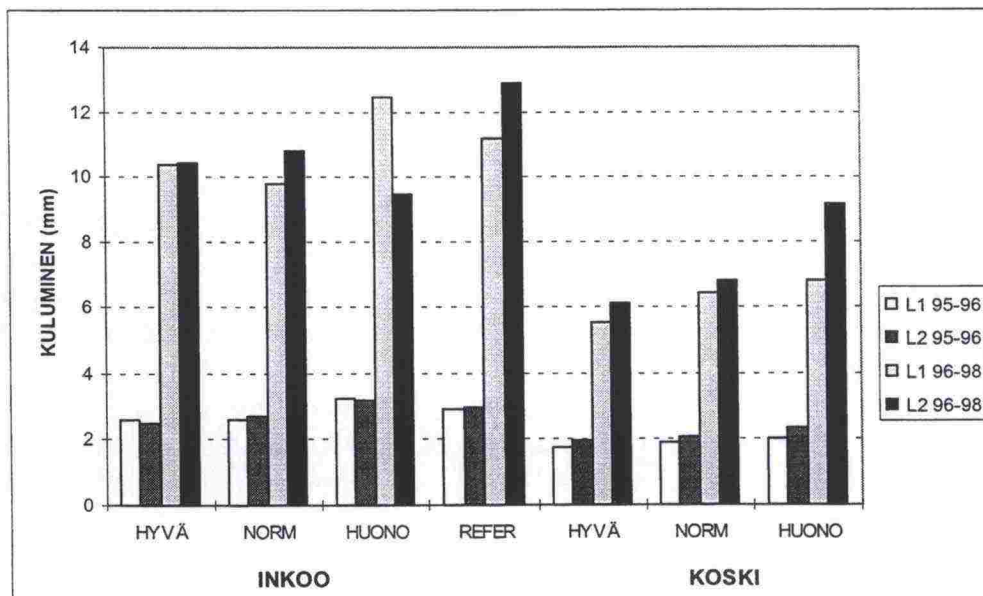
Toisen talven kulumisarvot olivat selvästi suurempia kuin ensimmäisen talven arvot (kuva 5). Varpaisjärven kivellä edellä mainittu ero oli muotoluokasta riippuen 75 - 93 %. Teiskon kivellä toisen talven kulumisarvot olivat puolestaan hyvällä ja normaalilla kiviaineksella kaksinkertaiset ensimmäisen talven arvoihin verrattuna. Muotoarvoltaan huonolla kiviaineksella mainittu ero jäi 75 %:iin. Kolmannen talven kulumisarvot olivat vastaavasti 8 - 19 % suurempia kuin toisen talven arvot. Mainittu ero oli suurimmillaan hyvämuo-



toisilla kiviaineksilla ja pienimmillään huonomuotoisilla kiviaineksilla. Inkoon ja Kosken kivillä tällaista vuosittaista kulumistarkastelua ei voida tehdä. Kuvan 6 mukaisesti myös näillä kivillä ensimmäisen talven kulumisarvot ovat selvästi pienempiä kuin kahden seuraavan talven aikaiset kulumat.

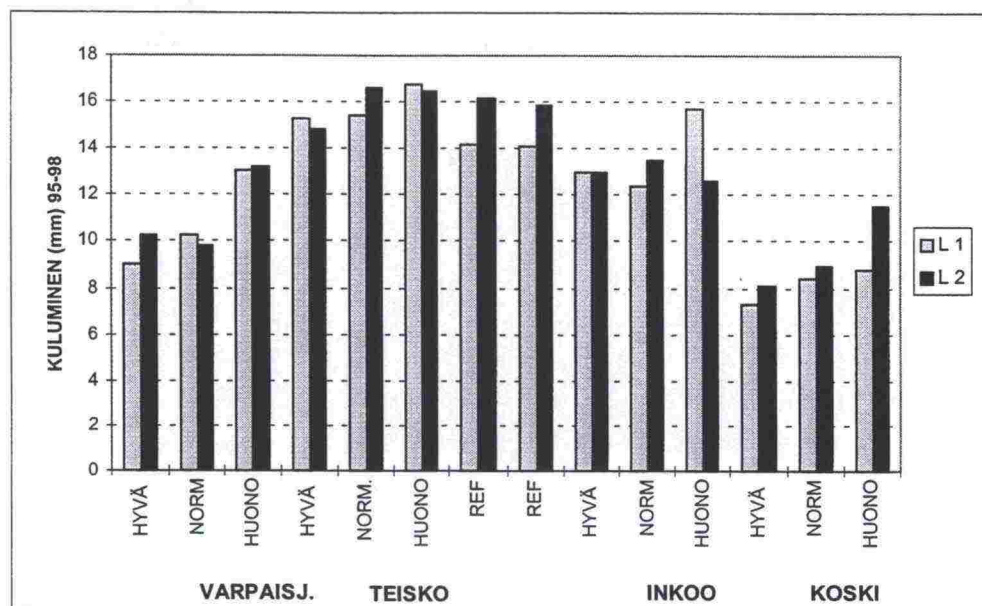


Kuva 2. Minikoetien eri massojen rinnakkaislaattojen (L1 ja L2) kulumisen talvien 1995 - 1996, 1996 - 1997 ja 1997 - 1998 aikana. Teiskon ja Varpaisjärven kivet.

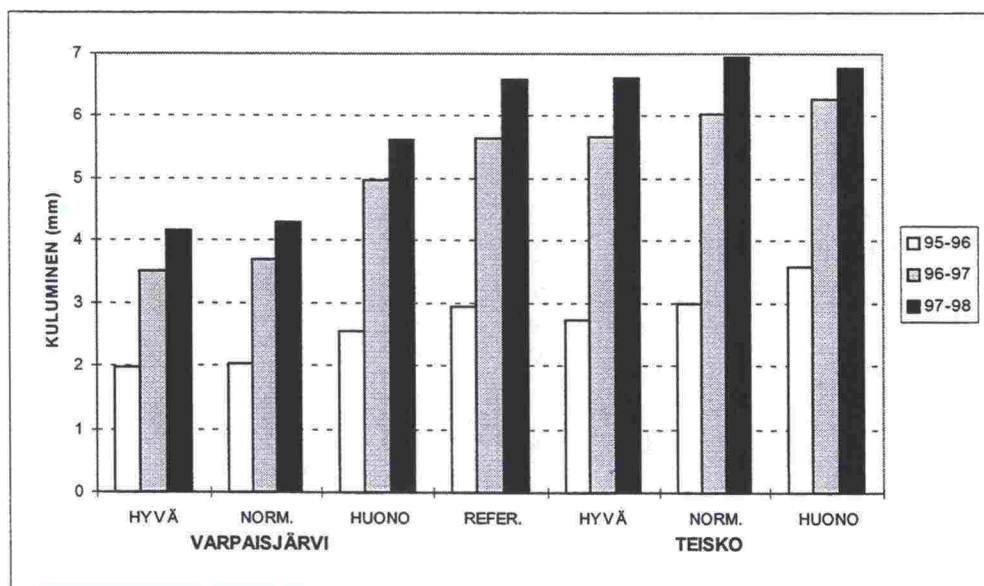


Kuva 3. Minikoetien eri massojen rinnakkaislaattojen (L1 ja L2) kulumisen talvien 1995 - 1996 sekä talvien 1996 - 1997 ja 1997 - 1998 (yhteenlaskettu kuluminen) aikana. Inkoon ja Kosken kivet.

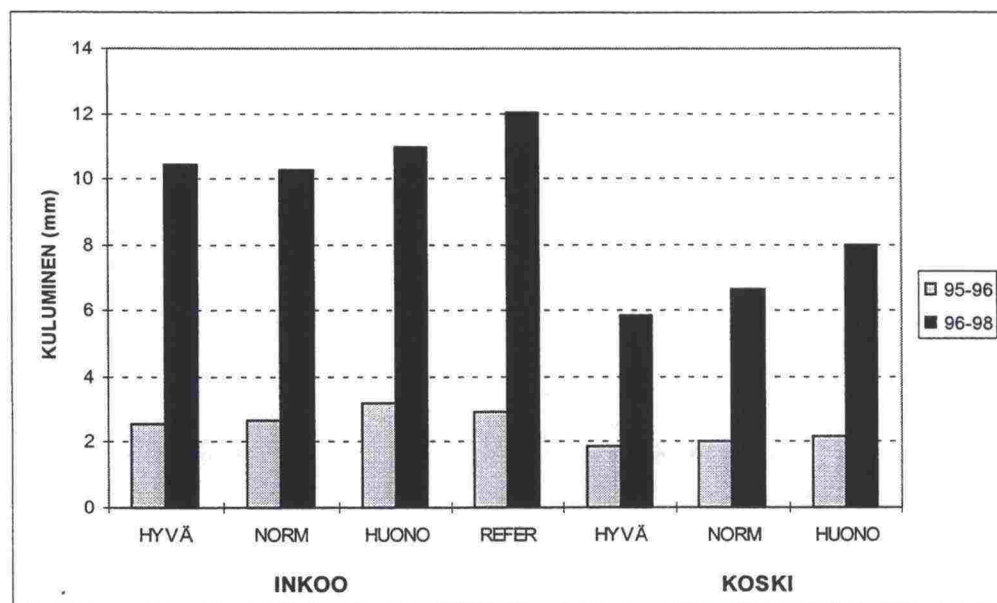




Kuva 4. Minikoetien eri massojen rinnakkaislaattojen (L 1 ja L 2) kuluminen talvien 1995 - 1996, 1996 - 1997 ja 1997 - 1998 aikana (yhteenlaskettu kuluminen).



Kuva 5. Minikoetien päällystelaattojen kuluminen kivikohtaisesti talvien 1995 - 1996, 1996 - 1997 ja 1997 - 1998 aikana. Teiskon ja Varpaisjärven kivet.

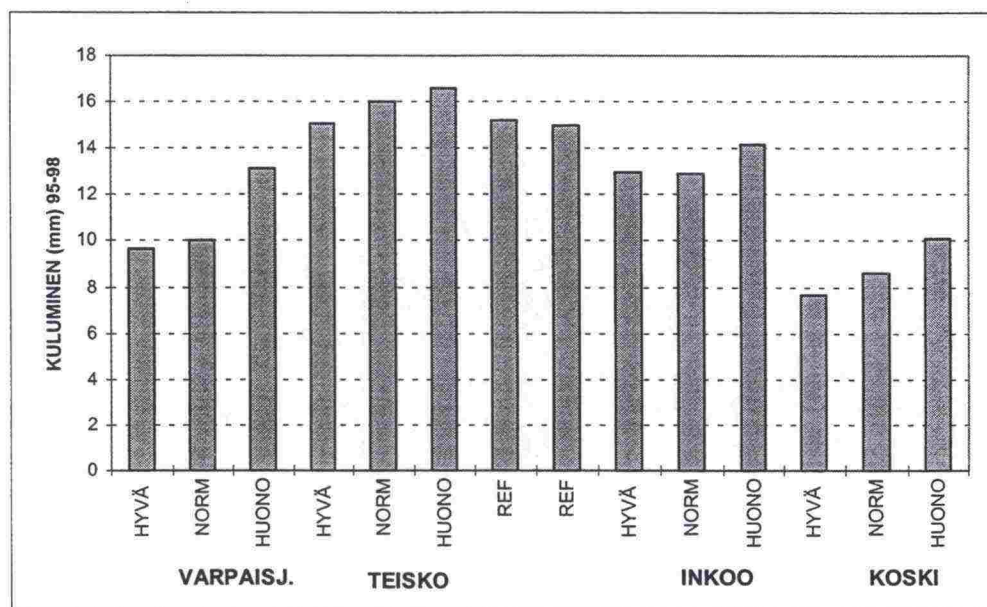


Kuva 6. Minikoetien päällystelaattojen kuluminen kivikohtaisesti talvien 1995 - 1996 sekä talvien 1996 - 1997 ja 1997 - 1998 (yhteenlaskettu kuluminen) aikana. Inkoon ja Kosken kivet.

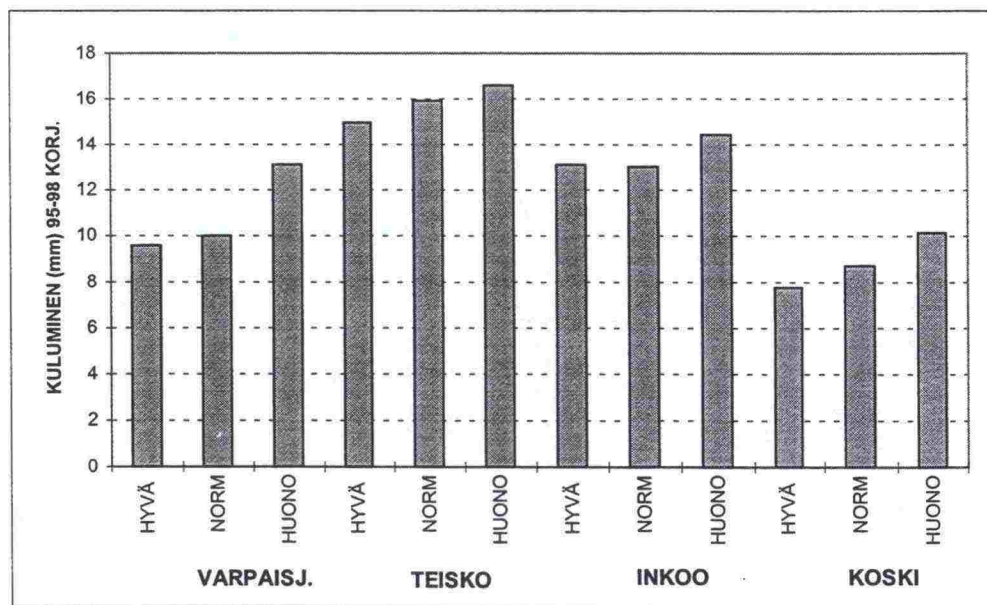
Kuvan 7 mukaisesti kaikilla neljällä kivellä vähiten ovat kuluneet ne laatat, joissa kiviaineksen muotoarvo on hyvä ja eniten ne laatat, joissa muotoarvo on huono. Ainoan poikkeuksen muodostavat Inkoon hyvämuotoinen ja normaalimuotoinen kiviaines, joiden kuluminen on ollut samaa luokkaa. Selvemmin muotoarvon vaikutus päällysteen kulumiseen koko muotoarvoskaalalla näkyi lujuusominaisuuksiltaan heikoimmalla ja parhaimmalla kivillä eli Teiskon ja Kosken kivillä. Varpaisjärven ja Inkoon kivillä muotoarvon vaikutus kulumiseen näkyi hyvin selvästi verrattaessa huonoa ja normaalia kiviainesta. Sen sijaan hyvän ja normaalin kiviaineksen välille ei saatu juurikaan kulumiseroa.

Kuvassa 8 esitetään päällystelaattojen kolmen talven yhteenlasketut kulumisarvot korjattuna referenssimassojen kulumisarvoilla. Korjattu arvo on saatu kertomalla laatan kulumisarvo referenssimassojen keskiarvon ja kyseisen osuuden referenssimassan arvon suhteella ja laskemalla näistä tuloksista massakohtainen keskiarvo. Vertaamalla kuvia 7 ja 8 havaitaan, että referenssilaattojen kulumisarvoilla korjaamattomat ja korjatut tulokset ovat lähes identtiset. Tämän vuoksi tuloksia tarkastellaan kuvan 7 mukaisilla alkuperäisillä kulumisarvoilla.

Toisen talven jälkeen minikoetien päällystelaatoissa oli heikosti havaittavissa pitkittäisuuuntaista epätasaisuutta. Kolmannen talven jälkeen epätasaisuus näkyi jo selvästi aaltomaisina kohoumina etenkin lujuudeltaan heikompia Teiskon ja Inkoon kiviä sisältävissä laatoissa.



Kuva 7. Minikoetien päällystelaattojen kuluminen kivikohtaisesti talvien 1995 - 1996, 1996 - 1997 ja 1997 - 1998 aikana (yhteenlaskettu kuluminen).

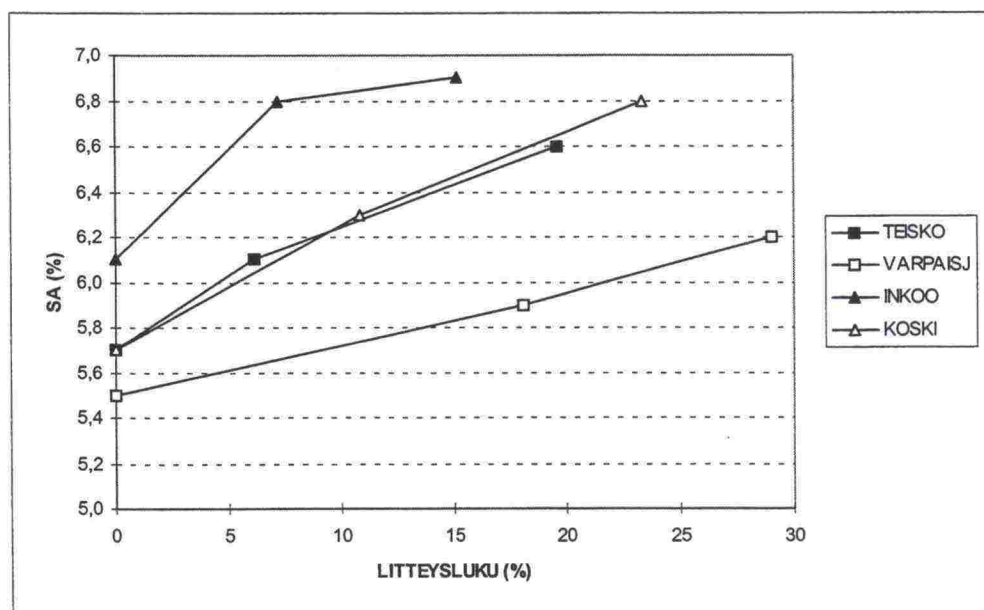


Kuva 8. Minikoetien päällystelaattojen kuluminen kivikohtaisesti talvien 1995 - 1996, 1996 - 1997 ja 1997 - 1998 aikana (yhteenlaskettu kuluminen). Referenssimassojen kulumisarvojen perusteella korjatut arvot.



## 7 TULOSTEN TARKASTELU

Kuvassa 9 esitetään Teiskon ja Varpaisjärven kiviainesten lajitteen 12,5 - 18 mm ja Inkoon ja Kosken kiviainesten lajitteen 12,5 - 20 mm litteysluvun vaikutus massojen optimisideainepitoisuuteen. Kiviaineksen raemuodon vaikutus SMA-massan optimisideainepitoisuuteen oli huomattava. Teiskon kivellä muotoarvoltaan hyvän ja huonon kiviaineksen optimisideainepitoisuuksien ero oli 0,9 %-yksikköä, Varpaisjärven kivellä 0,7 %-yksikköä, Inkoon kivellä 0,8 %-yksikköä ja Kosken kivellä 1,1 %-yksikköä. Tutkimuksen normaalimuotoiseen kiviainekseen verrattuna muotoarvon parantamisella eli muotoarvoltaan hyvällä kiviaineksella saavutettiin tutkituilla kivillä 0,4 - 0,7 %-yksikön vähennys sideainemäärässä.



Kuva 9. Kiviaineksen lajitteen 12,5 - 18 mm (20 mm) litteysluvun vaikutus SMA-massojen optimisideainepitoisuuteen.

Toisen talven (1996 - 1997) päällystelaattojen kulumisarvot olivat 75 - 105 % suurempia kuin ensimmäisen talven (1995 - 1996) kulumisarvot (Varpaisjärven ja Teiskon kivet). Tähän on löydettävissä kaksi eri syytä. Ensimmäkin toisen talven määrän ajan osuus oli suurempi vähäisestä pakkasmäärästä johtuen. Toiseksi kyseisen talven minikoetiemittausten välinen aika oli lähes 2 kuukautta pidempi kuin edellisenä talvena. Tämä johtui ensimmäisen talven syksyn mittauksen myöhäistämisestä päällysteen mastiksin kuluttamiseksi ja toisen talven kevään mittauksen myöhäistämisestä pidentyneen nastarengaskauden vuoksi. Kolmannen talven (1997 - 1998), jonka pakkasmäärä oli samaa tasoa edellisen talven kanssa, kulumisarvot olivat puolestaan 8 - 19 % suurempia kuin toisen talven kulumisarvot.

Taulukossa 5 on esitetty kaikkien neljän kiven hyvämuotoista ja huonomuotoista kiviainesta sisältävien laattojen kulumisen suhteessa saman kiven

normaalimuotoista kiviainesta sisältävien laattojen kulumiseen. Plusmerkkinen arvo kuvaa montako prosenttia suurempi ja miinusmerkkinen arvo montako prosenttia pienempi kulumisarvo on ollut kuin saman kiven normaalimuotoisen kiviaineksen kulumisen. Lisäksi taulukossa on esitetty montako prosenttia huonomuotoisen kiviaineksen kulumisen on suurempi kuin vastaavan kiven hyvämuotoisen kiviaineksen kulumisen. Kyseessä on kolmen talven yhteenlasketut kulumisarvot.

*Taulukko 5. Päälystelaattojen kolmen talven yhteenlaskettujen kulumisarvojen prosentuaalinen vertailu (lihavoitu lukuarvo) saman kiven normaalimuotoista kiviainesta sisältävien laattojen kulumiseen (Vrt Norm) sekä vastaava kivikohtainen vertailu huono- ja hyvämuotoisten kiviainesten kesken (Hu vrt Hy). Taulukossa on esitetty myös eri muotoluokkien kiviainesten lajitteen 12,5 - 18 / 20 mm litteysluku.*

Kivi	Muoto / litteys %	Normaalimuot. litteys %	Vrt Norm %	Hu vrt Hy %
TEISKO	Hyvä / 0,0	6,2	- 6	+ 11
	Huono / 19,6		+ 4	
VARP.JÄRVI	Hyvä / 0,0	18,1	- 4	+ 36
	Huono / 29,0		+ 31	
INKOO	Hyvä / 0,0	7,2	0	+ 9
	Huono / 15,2		+ 10	
KOSKI	Hyvä / 0,0	10,8	- 11	+ 32
	Huono / 23,4		+ 17	

Tarkasteltaessa kolmen talven yhteenlaskettuja kulumiseroja prosentuaalisina arvoina voidaan todeta, että hyvämuotoisen kiviaineksen kulumisen oli tutkituilla kivillä 0 - 11 % vähäisempää ja huonomuotoisen kiviaineksen kulumisen 4 - 31 % suurempaa kuin normaalimuotoisella kiviaineksella. Vastaavasti huonomuotoisen kiviaineksen kulumisen oli hyvämuotoiseen kiviainekseen verrattuna 9 - 36 % suurempaa.

Edellä mainittuja %-arvoja tarkasteltaessa eri talvien (Teiskon ja Varpaisjärven kivillä talvet 1995 - 1996, 1996 - 1997 ja 1997 - 1998) kulumisarvojen mukaan voidaan todeta arvojen olleen Varpaisjärven kivillä samaa suuruusluokkaa joka talvi. Sen sijaan Teiskon kivillä huonomuotoisen kiviaineksen kulumisen on normaalimuotoiseen kiviainekseen verrattuna vähentynyt vuosi vuodelta. Ensimmäisenä talvena huonomuotoinen kiviaines kului 19 % enemmän ja viimeisenä talvena 3 % vähemmän kuin normaalimuotoinen kiviaines. Vastaavasti huonomuotoinen kiviaines kului ensimmäisenä talvena 29 % ja viimeisenä talvena enää 2 % enemmän kuin hyvämuotoinen kiviaines.

Verrattaessa hyvämuotoisia kiviaineita keskenään kului Varpaisjärven kivi 25 %, Inkoon kivi 68 % ja Teiskon kivi 95 % enemmän kuin kulutuskestävyydeltään paras Kosken kivi. Normaalimuotoisilla kiviaineksella edellä mainitut kolmen talven yhteenlasketuista kulumisarvoista lasketut kulumiserot olivat vastaavasti 16, 49 ja 85 % sekä huonomuotoisella kiviaineksella 30, 40 ja 64 %.



Tuloksia tarkasteltaessa on huomioitava, etteivät tutkittujen kivien muotoarvot normaaleilla ja huonomuotoisilla kiviaineksilla aivan vastanneet toisiaan. Tarkastelemalla lajitteen 12,5 - 20 mm (12,5 - 18 mm) litteyslukuja havaitaan, että esimerkiksi Teiskon huonomuotoinen kiviaines vastaa litteysluvultaan Varpaisjärven normaalimuotoista kiviainesta. Mikäli verrataan keskenään (kuva 10) esimerkiksi 10 % litteysluvun omaavia kiviaineksia, kuuluu Teiskon kivi noin 88 %, Inkoon kivi 56 % ja Varpaisjärven kivi 14 % enemmän kuin Kosken kivi. Lisäksi on huomioitava, että normaalimuotoinen kiviaines koostuu sekä hyvä- että huonomuotoisista rakeista, kun taas hyvä- ja huonomuotoiset kiviainekset sisältävät vain kyseisen muotoluokan rakeita.

Kuvien 10 ja 11 perusteella havaitaan, että litteysluvun vaikutus päällysteen kulumiseen oli erilaista eri kivillä. Kuvan 10 mukaisesti koko litteyslukuskala huomioiden 5 %-yksikön huononeminen lajitteen 12,5 - 20 mm litteysluvussa lisää päällysteen kulumista Teiskon kivellä 1 - 5 %, Inkoon kivellä 0 - 6 %, Varpaisjärven kivellä 1 - 14 % ja Kosken kivellä 5 - 7 %.

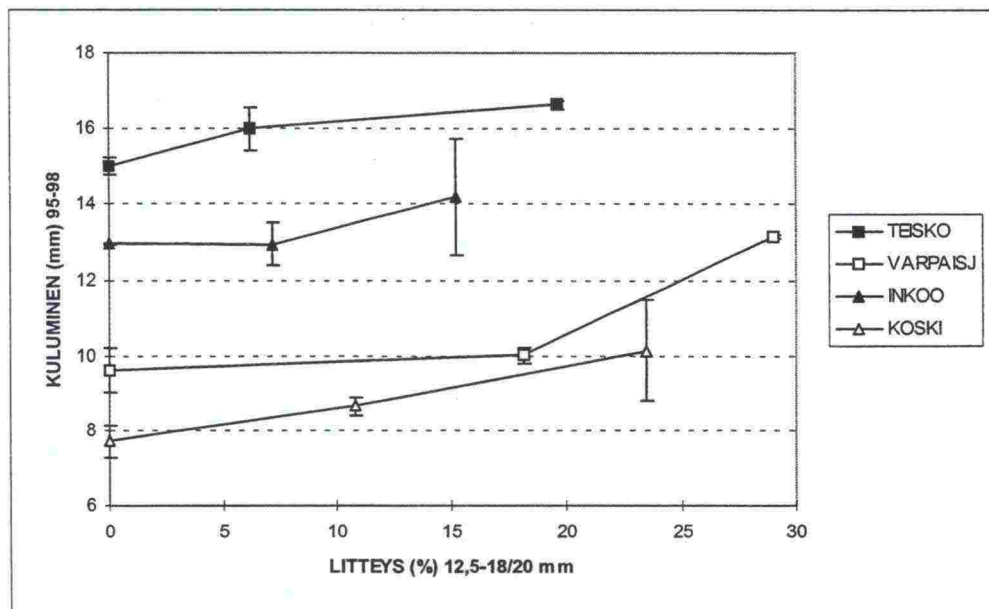
Inkoon ja Varpaisjärven kivillä litteysluvun vaikutus päällysteen kulumiseen oli hyvin vähäinen tai olematon (kuvat 10 ja 11), kun tarkastellaan normaalimuotoisen ja hyvämuotoisen kiviaineksen kulumiseroja. Sen sijaan näillä kivillä muotoarvon huonontumisella normaalitapaukseen verrattuna oli vaikutusta kulumiseen. Toisaalta on huomioitava, että Inkoon kiven normaalimuotoinen kiviaines oli muotoarvoltaan (12,5 - 20 mm litteysluku 7,2 %) todella hyvää päinvastoin kuin Varpaisjärven kiven normaalimuotoinen kiviaines (12,5 - 18 mm litteysluku 18,1 %). Inkoon huonomuotoinen kiviaines vastasi muotoarvoltaan lähes Varpaisjärven normaalimuotoista kiviainesta.

Teiskon ja Kosken kivillä litteysluvulla oli vaikutusta päällysteen kulumiseen (kuvat 10 ja 11), kun tarkastellaan normaalimuotoisen ja hyvämuotoisen kiviaineksen kulumiseroja. Myös muotoarvon huonontumisella normaalitapaukseen verrattuna oli vaikutusta kulumiseen.

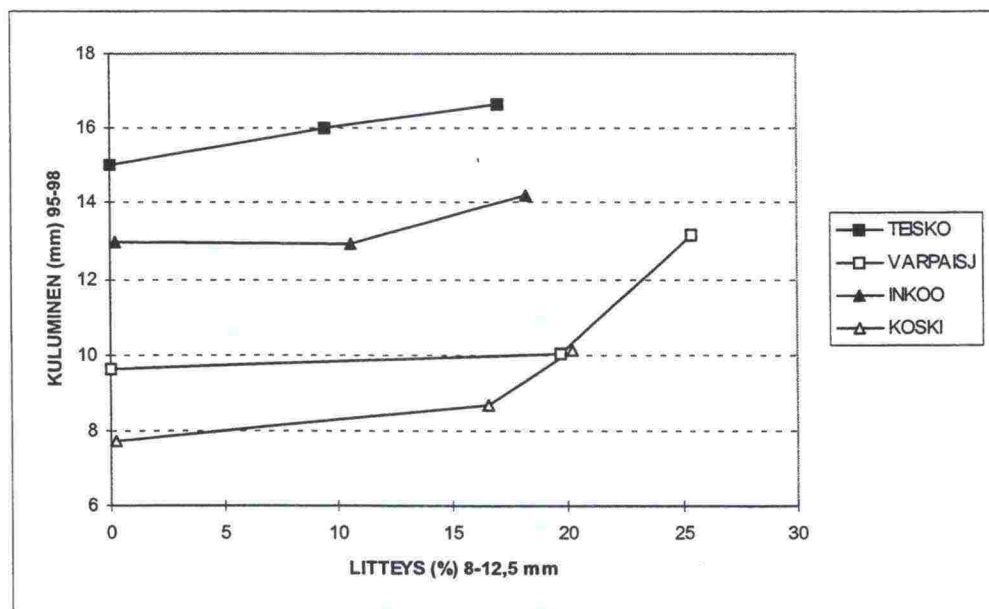
Niiden massojen, joiden rinnakkaislaattojen väliset kulumiserot olivat suurimpia (vrt. kuva 10), kulumisarvojen hajonnat selittyvät hyvin pitkälle laattojen sijainnilla minikoetieosuuksilla eli sijaitsevatko ne kulutuskestävyydeltään hyvää kiveä (suojaava vaikutus) vai keskinkertaista kiveä sisältävien laattojen jälkeen. Minikoetilaattojen keskinäiset kulumiserot sekä tien varsinaisen päällysteen ja minikoetilaattojen keskinäiset kulumiserot lisäävät yliajaviin autojen jousituksen aiheuttamaa pystysuoraa liikettä ja päällystelaattojen epätasaista kulumista.

Teiskon ja Varpaisjärven kivillä voidaan myös tarkastella TIE-menetelmän mukaisten muotoarvojen ja päällystelaattojen kulumisen välistä riippuvuutta (kuvat 12 ja 13). 0,2 %-yksikön lisäys lajitteen 12 - 16 mm liuskeisuudessa (b/a) lisää Teiskon kivellä päällysteen kulumista noin 4 %. Vastaava 0,2 %-yksikön lisäys lajitteen 12 - 16 mm puikkoisuudessa (c/a) lisää puolestaan kulumista noin 3 - 4 %. Varpaisjärven kivellä vain muotoarvon huonontumisella normaalitapaukseen verrattuna oli selvä vaikutus kulumiseen. Tällöin 0,2 %-yksikön lisäys liuskeisuudessa lisää päällysteen kulumista yli 30 % ja vastaava lisäys puikkoisuudessa on noin 10 - 12 %.

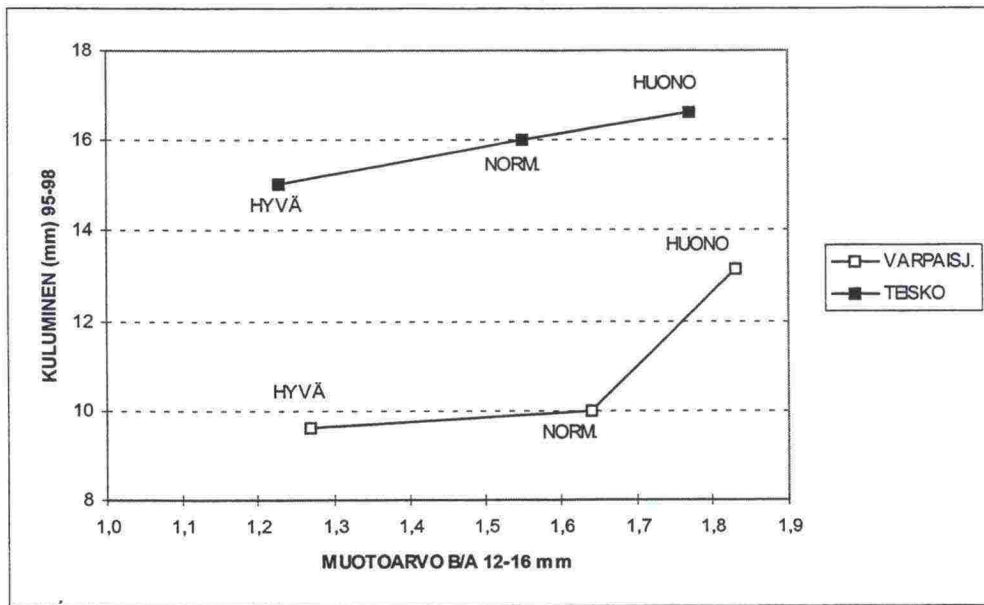




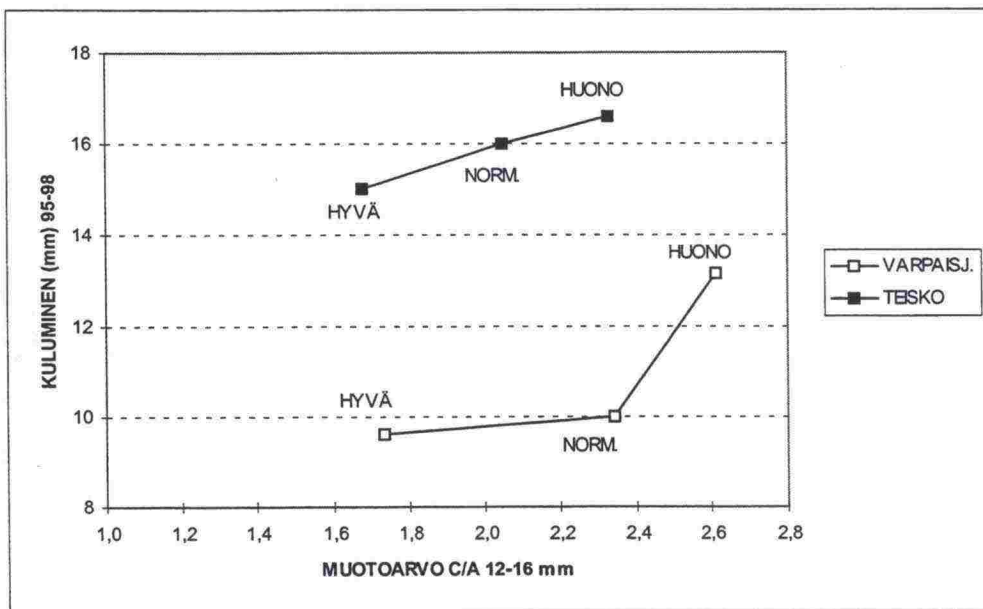
Kuva 10. Minikoetien päällystelaattojen kulumisen (talvet 1995 - 1996, 1996 - 1997 ja 1997 - 1998 yhteensä) ja kiviainesten 12,5 - 20 mm lajitteen (Teisko ja Varpaisjärvi 12,5 - 18 mm) litteysluvun riippuvuus. Jokaisen pisteen kohdalla on esitetty rinnakkaislaattojen kulumisarvojen hajonta.



Kuva 11. Minikoetien päällystelaattojen kulumisen (talvet 1995 - 1996, 1996 - 1997 ja 1997 - 1998 yhteensä) ja kiviainesten 8 - 12,5 mm lajitteen litteysluvun riippuvuus.

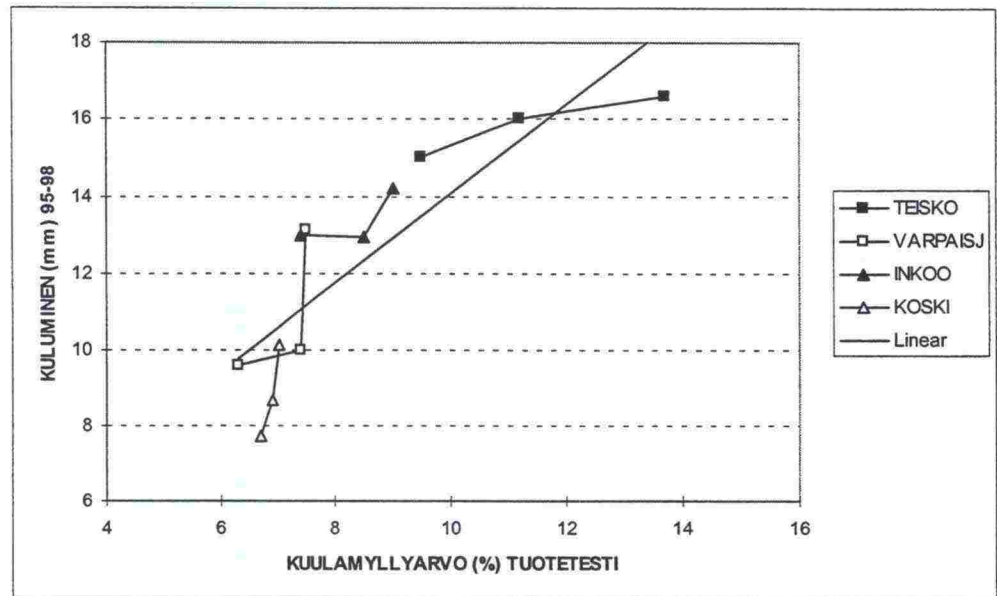


Kuva 12. Minikoetien päällystelaattojen kulumisen (talvet 1995 - 1996, 1996 - 1997 ja 1997 - 1998 yhteensä) ja kiviainesten 12 - 16 mm lajitteen liuskeisuuden b/a riippuvuus Teiskon ja Varpaisjärven kiviaineksilla.



Kuva 13. Minikoetien päällystelaattojen kulumisen (talvet 1995 - 1996, 1996 - 1997 ja 1997 - 1998 yhteensä) ja kiviainesten 12 - 16 mm lajitteen puikkoisuuden c/a riippuvuus Teiskon ja Varpaisjärven kiviaineksilla.

Kuten kuvasta 1 (sivu 13) havaittiin kiviaineksen raemuodon vaikutus kuulamyllyarvoon väheni selvästi kiviaineksen lujuuden lisääntyessä. Esimerkiksi Kosken kivellä lajitteen 12,5 - 20 mm yli 23 %-yksikön muutos litteysluvussa näkyi vain 0,3 %-yksikön muutoksena kuulamyllyarvossa.



Kuva 14. Minikoetien päällystelaattojen kulumisen (talvet 1995 - 1996, 1996 - 1997 ja 1997 - 1998 yhteenlaskettuna) ja kiviainesten kuulamylläarvon (tuotetesti) riippuvuus.

Kaikilla tutkituilla kivillä kuulamylläarvon kasvaessa myös päällystelaattojen kulumiset kasvoivat (kuva 14). Kulumiskestävyyden ennustettavuus käyrästä ei ole kuitenkaan suoraviivaista. Kaikki 12 päällystemassaa huomioiden kuulamylläarvon (tuotetesti) ja päällysteen kulumisen välinen korrelaatio oli melko hyvä ( $r = 0,85^{***}$ ; lineaarinen korrelaatio). Ei-lineaarinen korrelaatio olisi jopa tätä parempi, mutta sitä ei tässä yhteydessä huomioidu, koska AS-TO-koeteiden tulosten mukaan päällysteen kulumisen ja kuulamylläarvon välinen riippuvuus on jokseenkin lineaarista. Lisäksi ei-lineaarisen riippuvuuden toteaminen edellyttäisi lisätuloksia kivillä, joiden kuulamylläarvo on selvästi yli 14 %.

Verrattaessa keskenään kuvan 14 tiettyä kuulamylläarvoa vastaavia todellisia kulumisarvoja ja korrelaatiosuoran osoittamia kulumisarvoja havaitaan, että ne eivät useinkaan vastaa toisiaan. Kulumisarvojen ero voi olla jopa yli 20 %.

Teiskon kivellä laattojen kulumisarvojen ja tuotetestinä määritettyjen kuulamylläarvojen välinen riippuvuus oli selkeä. Varpaisjärven kivellä, jolla eri muotoarvoisten kiviainesten kuulamylläarvojen erot olivat pieniä, hyvämuotoisen ja normaalimuotoisen kiviaineksen kuulamylläarvon 1,2 %-yksikön muutos näkyi huonosti laatan kulumisessa, kun taas normaalimuotoisen ja huonomuotoisen kiviaineksen kuulamylläarvon vähäinen 0,1 %-yksikön muutos vaikutti selvästi minikoetien päällystelaatan kulumiseen. Myös Inkoon kivellä kuulamylläarvon ja päällysteen kulumisen välinen suhde oli samankaltainen. Kosken kivellä edellä mainittu riippuvuus oli selkeä, vaikkakin eri muotoarvoisten kiviainesten kuulamylläarvojen erot olivat pieniä.

Tässä kappaleessa mainitut eri muuttujien väliset korrelaatiokertoimet koskevat kaikki lineaarista korrelaatiota. Korrelaation merkitsevyys on tässä

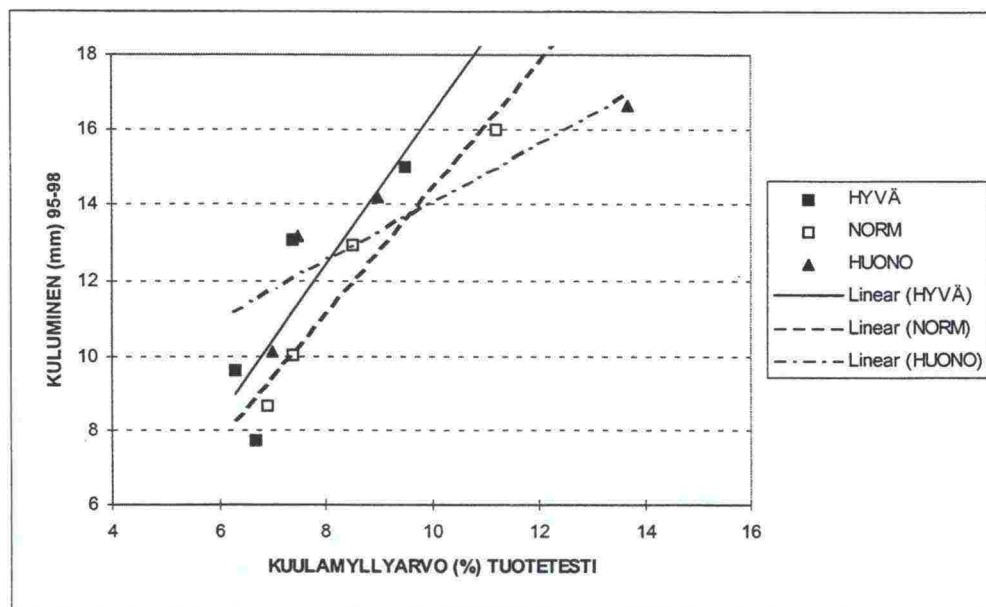


kappaleessa esitetty merkeillä \*\*\* (erittäin merkitsevä korrelaatio, riskitaso 0,1 %), \*\* (merkitsevä korrelaatio, riskitaso 1%), \* (jokseenkin merkitsevä korrelaatio, riskitaso 5 %) ja ° (suuntaa-antava korrelaatio, riskitaso 10 %). Mikäli mitään näistä merkeistä ei ole esitetty korrelaatiokertoimen yhteydessä, riskitaso on huonompi kuin 10 %.

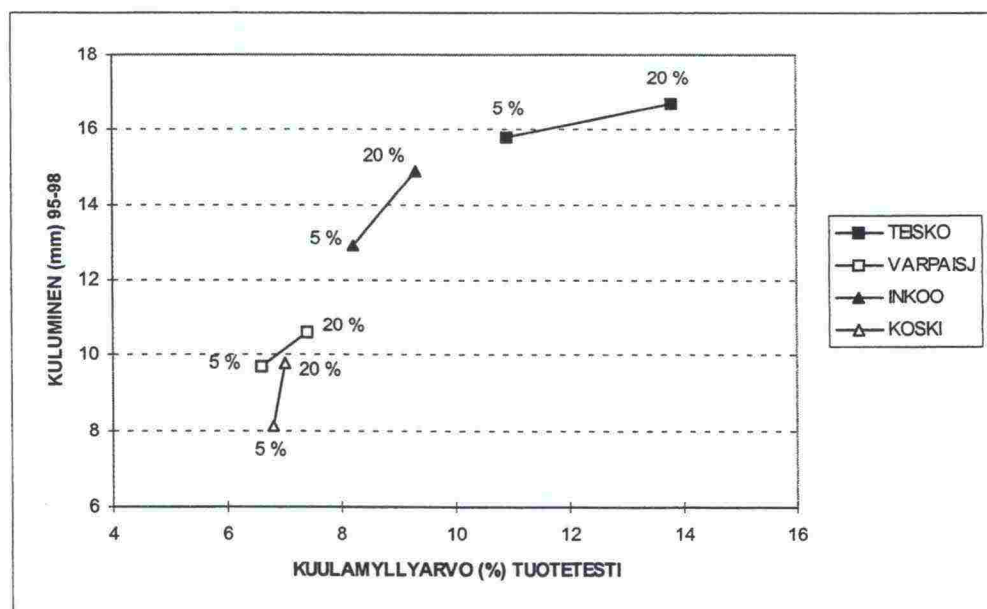
Kuvissa 15, 17 ja 19 esitetään päällysteen kulumisen ja eri lujuusarvojen väliset riippuvuudet erikseen eri muotoluokan kiviaineksilla. Kuvissa 16, 18 ja 20 esitetään samat riippuvuudet kiviaineksilla, joiden litteysluku on 5 % ja 20 %. Tämä litteyslukuero kuvaa sitä tilannetta, joka on parhaimmillaan toteutettavissa murskausteknisin keinoin käyttämällä esimerkiksi kubisaattoria. Mainittuja litteyslukuja vastaavat kulumisarvot on saatu kuvasta 10 ja kuulamylyarvot (tuotetesti) kuvasta 1. Koska Inkoon kivellä ei tässä tutkimuksessa edes huonomuotoisella kiviaineksella päästy 20 % litteyslukuun, tätä litteyslukua vastaavat kulumis- ja kuulamylyarvot on arvioitu suoraviivaisesti edellä mainituista kuvista.

Kuvassa 15 esitetään päällysteen kulumisen ja kuulamylyarvon välinen riippuvuus erikseen eri muotoluokan kiviaineksilla. Näin tarkasteltuna korrelaatio-suorat poikkeavat selvästi toisistaan. Eri muotoluokkien suorat poikkeavat myös koko aineiston (kaikki kivet ja kaikki muotoluokat yhdessä) korrelaatio-suorasta. Koska huonomuotoisen kiviaineksen korrelaatio-suoran kulmakertoimen poikkeaa selvästi muiden muotoluokkien suorien kulmakertoimesta, korrelaatio-suoria ei voida käyttää päällysteen kulumisen ennustamiseen. Kulumisen ja kuulamylyarvon välinen korrelaatiokerroin ( $r$ ) on hyvämuotoisilla kiviaineksilla 0,86, normaalimuotoisilla kiviaineksilla 0,98\* ja huonomuotoisilla kiviaineksilla 0,89. Kuvassa 16 esitetään vastaavasti kulumisen ja kuulamylyarvon välinen riippuvuus 5 % ja 20 % litteysluvun omaavilla kiviaineksilla.

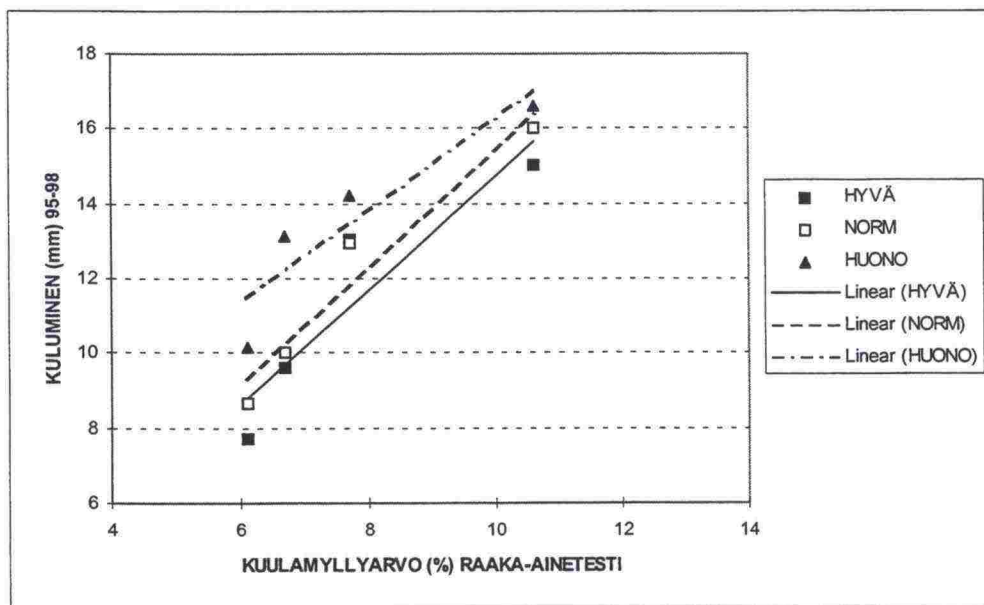
Tarkasteltaessa (kuvat 17 ja 18) päällysteen kulumisen ja raaka-ainetestinä määritetyn kuulamylyarvon välistä riippuvuutta havaitaan, ettei kuulamylyarvolla voi tässä tapauksessa täysin luotettavasti ennustaa päällysteen kulumista. Tämä siitäkin huolimatta, että kulumisen ja kuulamylyarvon välinen korrelaatio (kuva 17) on jälleen melko hyvä ( $r = 0,88^{***}$ ). Kuvassa 17 on siis sekä hyvä-, normaali- että huonomuotoisille kiviaineksille annettu kivikohtaisesti sama kuulamylyarvo. Kuulamylyarvo on tosin tässä tutkimuksessa määritetty raaka-ainetestinä normaalimuotoisesta kiviaineksesta välppäemällä, ei siis laboratoriossa murskatusta materiaalista. Kulumisen ja kuulamylyarvon välinen korrelaatiokerroin ( $r$ ) on hyvämuotoisilla kiviaineksilla 0,93°, normaalimuotoisilla kiviaineksilla 0,97\* ja huonomuotoisilla kiviaineksilla 0,92°. Kuvasta 18 havaitaan, että kuulamylykoe antaa raaka-ainetestinä Inkoon kiven kulumiskestävydestä liian hyvän kuvan.



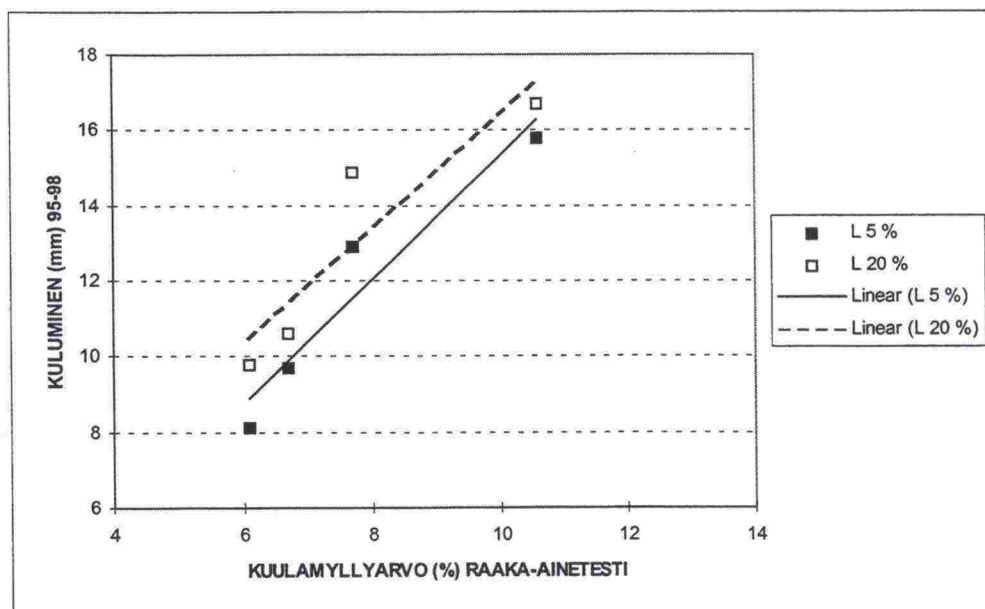
Kuva 15. Minikoetien päällystelaattojen kulumisen (talvet 1995 - 1996, 1996 - 1997 ja 1997 - 1998 yhteenlaskettuna) ja kiviainesten kuulamylläarvon (tuotestesti) riippuvuus eri muotoluokilla.



Kuva 16. Minikoetien päällystelaattojen kulumisen (talvet 1995 - 1996, 1996 - 1997 ja 1997 - 1998 yhteenlaskettuna) ja kiviainesten kuulamylläarvon (tuotestesti) riippuvuus 5 % ja 20 % litteysluvun omaavilla kiviaineksilla.

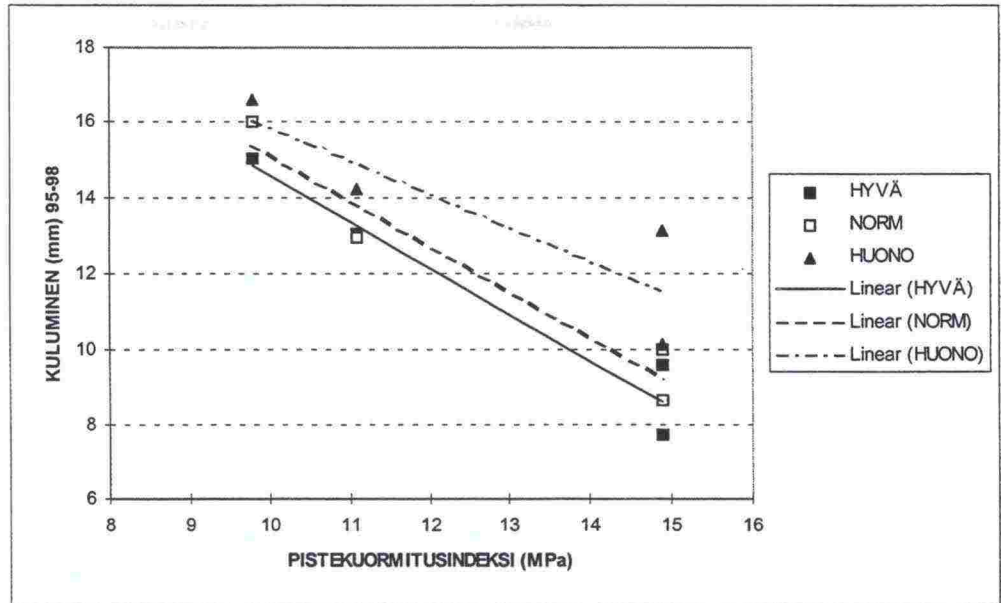


Kuva 17. Minikoetien päällystelaattojen kulumisen (talvet 1995 - 1996, 1996 - 1997 ja 1997 - 1998 yhteenlaskettuna) ja kiviainesten kuulamyllyarvon (raaka-ainetestä) riippuvuus eri muotoluokilla.

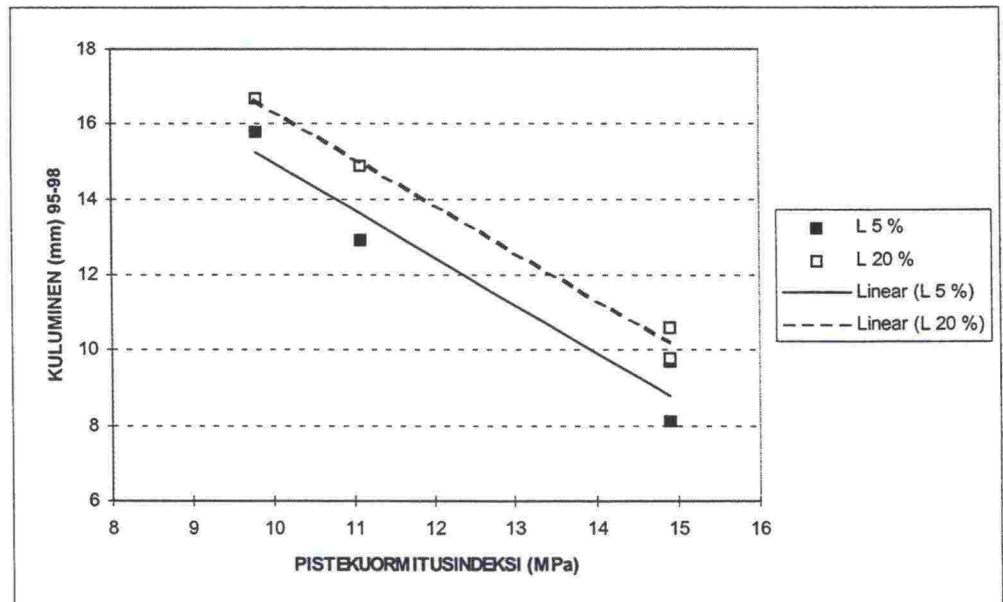


Kuva 18. Minikoetien päällystelaattojen kulumisen (talvet 1995 - 1996, 1996 - 1997 ja 1997 - 1998 yhteenlaskettuna) ja kiviainesten kuulamyllyarvon (raaka-ainetestä) riippuvuus 5 % ja 20 % litteysluvun omaavilla kiviaineksilla.





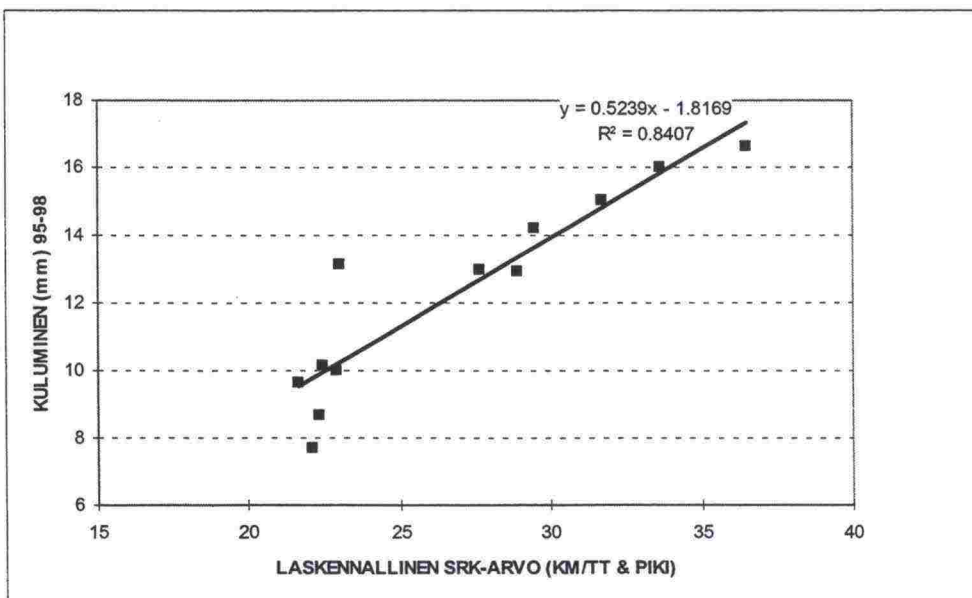
Kuva 19. Minikoetien päällystelaattojen kulumisen (talvet 1995 - 1996, 1996 - 1997 ja 1997 - 1998 yhteenlaskettuna) ja kiviainesten pistekuormitusindeksin riippuvuus eri muotoluokilla.



Kuva 20. Minikoetien päällystelaattojen kulumisen (talvet 1995 - 1996, 1996 - 1997 ja 1997 - 1998 yhteenlaskettuna) ja kiviainesten pistekuormitusindeksin riippuvuus 5 % ja 20 % litteysluvun omaavilla kiviaineksilla.

Päällystelaattojen kuluminen korreloi melko hyvin myös pistekuormitusindeksin kanssa (kuva 19,  $r = 0,88^{***}$  ja kuva 20). Vain Varpaisjärven huonomuotoinen kiviaines erottuu selvästi muusta pistejoukosta. Koska pistekuormitus tehdään kairasydämistä raaka-ainetestinä, saman kiven eri muotoluokan kiviaineksille on kuvassa 19 annettu sama pistekuormitusarvo. Kun kulumisen ja pistekuormituksen välistä riippuvuutta tarkastellaan muotoluokittain, havaitaan näiden välisten korrelaatiokertoimien ( $r$ ) olevan sekä hyvällä että normaalilla kiviaineksella  $0,97^*$ , mutta huonolla kiviaineksella  $0,87$ . Hyvämuotoisen kiviaineksen kulumisen ja pistekuormitusindeksin hyvä riippuvuus onkin luonnollista, koska pistekuormitusindeksi edustaa kiven ns. optimaalista lujuutta.

ASTO-projektin koeteiden tulosten perusteella päällysteen kulumiselle saatiin /9/ kahden muuttujan malli kaavalla *Koetiekuluminen SRK-arvona*  $= 1,15 \times \text{kuulamylyarvo} - 1,25 \times \text{pistekuormitusindeksi} + 33,01$ . Sovellettaessa tätä kaavaa tämän tutkimuksen aineistoon päästään tuotetestin kuulamylyarvoa käyttäen korrelaatiokertoimeen ( $r$ )  $0,92$  (kuva 21) ja raaka-ainetestin kuulamylyarvoa käyttäen korrelaatiokertoimeen  $0,91$ .



Kuva 21. ASTO-kulumismallin ja todellisen kulumisen välinen yhteys.

Muotoarvon vaikutus päällysteen kestoikään laskettiin /9/ kahdella erityyppisellä tiellä (moottoritie KVL 18 000 ja maantie KVL 7500), joissa massana on SMA 18 (B-80 bitumi). Kestoiät on esitetty taulukossa 6 a. Päällysteen kestoiät moottoritiellä vaihtelivat eri kiviaineksia käyttäen 3 vuodesta 6 vuoteen ja tavallisella maantiellä 10 vuodesta 15 vuoteen. Koska kyseessä oleva kestoikämalli perustuu ASTO-projektin koetietuloksiin, sillä ei ole mahdollista saada luotettavaa kestoikää Vt 1:n kaltaisille hyvin vilkkaasti liikennöidyille (KVL yli 27 000) moottoriteille.

Taulukko 6. Päällysteen kestoiät a) eri muotoluokan omaaville kiviaineksille ja b) litteysluvun 5 % ja 20 % omaaville kiviaineksille.

a)

Kivi	Muoto	Kestoiä vuosina	
		kvl = 18 000	kvl = 7 500
VARP.JÄRVI	Hyvä	5	13
	Norm.	5	13
	Huono	4	10
KOSKI	Hyvä	6	15
	Norm.	5	13
	Huono	4 - 5	12
TEISKO	Hyvä	4	10
	Norm.	4	10
	Huono	4	10
INKOO	Hyvä	4 - 5	11
	Norm.	4	10
	Huono	3	10

b)

Kivi	Litteys %	Kestoiä vuosina	
		kvl = 18 000	kvl = 7 500
VARP.JÄRVI	20	5	12
	5	5	13
KOSKI	20	5	13
	5	5 - 6	14
TEISKO	20	4	10
	5	4	10
INKOO	20	4	10
	5	4 - 5	11 - 12

Toinen kestoikä tarkastelu tehtiin vertaamalla (kuva 10) keskenään litteysluvun 20 % ja 5 % omaavia kiviaineksia. Tämä ero kuvaa sitä tilannetta, joka on parhaimmillaan toteutettavissa murskausteknisin keinoin käyttämällä esimerkiksi kubisaattoria. Kestoiät on esitetty kuvassa 6 b. Koska Inkoon kivelä ei tässä tutkimuksessa edes huonomuotoisella kiviaineksella päästy 20 % litteyslukuun, tätä litteyslukua vastaava kulumisarvo on arvioitu suoraviivaisesti kuvasta 10. Litteyslukuja 20 % ja 5 % vastaavia kulumisarvoja tarkasteltaessa ns. normaalimuotoista kiviainesta sisältävälle päällysteelle saatiin kestoiäksi moottoritiellä 4 - 5 vuotta ja tavallisella tiellä 10 - 13 vuotta. Ns. kubisoidulle kiviainekselle kestoiät olivat vastaavasti 4 - 6 vuotta ja 10 - 14 vuotta.

Kesien 1996 ja 1997 aikana tapahtuneet yhteenlasketut poikkiprofiilin muutokset olivat Teiskon ja Varpaisjärven massoilla välillä 0,36 - 0,63 mm (taulukko 3). Profiilimuutoksiin sisältyy päällysteen tiivistymisen ja deformaation lisäksi vähäisessä määrin päällysteen kulumista, joten näitä tuloksia ei ole käsitelty tässä yhteydessä.



Tutkimuksessa oli neljä kiviainesta, jotka käyttäytyivät kulumisen suhteen toisistaan poikkeavasti. Tuloksista ei voi vetää kovin yleistäviä johtopäätöksiä, koska kivet käyttäytyivät yksilöllisesti murskauksessa ja päällysteessä. Lisäksi lujuusominaisuuksiltaan keskinkertaisia Teiskon ja Inkoon kiviä ei normaalikäytännön mukaisesti käytetä näin vilkkaasti liikennöidyillä teillä.

Pitää myöskin muistaa, että edellä mainitut seikat koskevat vain päällysteen kulumisominaisuuksia. Kiviaineksen hyvin huono muotoarvo saattaa vaikuttaa negatiivisesti esimerkiksi päällysteen tiivistymisominaisuuksiin ja toisaalta todella hyvä muotoarvo voi lisätä päällysteen deformaatioherkkyyttä.

## 8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Minikoetiemenetelmä on osoittautunut toimivaksi koemenetelmäksi. Vt 1:llä jo yhden talven jälkeen saatiin eri päällystemassoille selviä kulumiseroja. Kulumiserojen varmistamiseksi tarvitaan erilaisten talviaikaisten olosuhteiden vuoksi vähintään kahden talven mittaukset. Menetelmän etuja ovat pienet materiaalmäärät, koelaattojen tarkka valmistaminen ja mittaus, mikä tekee mahdolliseksi pientenkin kulumiserojen ja massamuuttujien vaikutusten selvittämisen luotettavasti vähäiselläkin liikennemäärällä. Minikoetierakentamisessa on syytä käyttää tutkittavasta massasta rinnakkaislaattoja tulosten varmistamiseksi.

Mittaustulosten perusteella kivirakeiden muoto vaikutti odotetusti päällyste-laattojen kulumiseen. Kaikilla neljällä kivellä eniten kuluivat ne laatat, joissa kiviaineksen muotoarvo oli huono ja yhtä kiveä lukuun ottamatta vähiten ne laatat, joissa muotoarvo oli hyvä. Selvimmin muotoarvon vaikutus päällysteen kulumiseen koko muotoarvoskaalalla näkyi lujuusominaisuuksiltaan heikoimmalla ja parhaimmalla kivillä eli Teiskon ja Kosken kivillä. Varpaisjärven ja Inkoon kivillä muotoarvon vaikutus kulumiseen näkyi hyvin selvästi verrattaessa huonoa ja normaalia kiviainesta. Sen sijaan hyvän ja normaalin kiviaineksen välille ei saatu juurikaan kulumiseroa.

Kolmen talven yhteenlaskettujen kulumistulosten perusteella hyvämuotoisen kiviaineksen kuluminen oli tutkituilla kivillä keskimäärin 5 % (0 - 11 %) vähäisempää ja huonomuotoisen kiviaineksen kuluminen keskimäärin 15 % (4 - 31 %) suurempaa kuin normaalimuotoisella kiviaineksella. Vastaavasti huonomuotoisen kiviaineksen kuluminen oli hyvämuotoiseen kiviainekseen verrattuna keskimäärin yli 20 % (9 - 36 %) suurempaa. Koko litteysluku-skaala huomioiden 5 %-yksikön huononeminen lajitteen 12,5 - 20 mm litteysluvussa lisää päällysteen kulumista keskimäärin noin 5 %.

Kiviaineksen kubisoinnilla esimerkiksi keskipakomyllyllä on parhaimmillaan mahdollista parantaa kiviaineksen karkeimman lajitteen litteyslukua arviolta 15 %-yksikköä, esimerkiksi litteysluvusta 20 % litteyslukuun 5 %. Tällöin kubisoinnilla on tutkittujen kivien perusteella mahdollista vähentää päällysteen kulumista keskimäärin noin 10 % (5 - 15 %). Päällysteen kestoikässä tämä ero voi parhaimmillaan merkitä yhden vuoden eroa runsaasti liikennöidyillä teillä (KVL esim. 18 000) ja yhden tai kahden vuoden eroa vähemmän liikennöidyillä teillä (KVL esim. 7 500).

Edellä mainitussa tulosten käsittelyssä ei ole huomioitu sitä, että kiviaineksen kubisointi lisää raemuodon paranemisen lisäksi kivirakeiden eheyttä ja näin myös näiden sisäistä lujuutta. Tässä tutkimuksessa kaikki kiviainekset ovat olleet peräisin samasta murskausvaiheesta.

Aikaisempien vuosien tulosten, jotka perustuivat pelkästään Varpaisjärven ja Teiskon kiviin, perusteella näytti siltä, että vain lujuudeltaan heikompien kivien normaalimurskauksessa syntyvien murskeiden muotoarvon parantamisella saavutetaan kulumiskestävyyden kannalta etua. Uusimmat tulokset, jotka perustuvat neljään erityyppiseen kiveen, eivät kuitenkaan tue edellä



mainittua väittämää. Tulosten perusteella ei voida tehdä yleistyksiä kivityypeittäin tai kiven lujuuden (kuulamylyarvo ja pistekuormitusindeksi) perusteella.

Kaikilla tutkituilla kivillä kuulamylyarvon (tuotetestin) kasvaessa myös päällystelaattojen kulumiset kasvoivat, joskin kulumisen muutoksen suuruus ei ollut ennustettavissa kuulamylytestillä. Mitatut kulumisarvot olivat varsinkin Varpaisjärven huonomuotoisella kiviaineksella selvästi suurempia kuin kuulamylyarvot antoivat olettaa. Inkoon kivellä hyvämuotoisen ja normaalimuotoisen kiviaineksen kulumisen oli samaa tasoa, vaikka kuulamylyarvot poikkesivat selvästi toisistaan.

Kiviaineksen raemuodon vaikutus päällystemassan optimisideainepitoisuuteen oli huomattava. Muotoarvoltaan hyvän ja huonon kiviaineksen optimisideainepitoisuuksien ero oli keskimäärin 0,9 %-yksikköä (0,7 - 1,1 %). Hyvällä ja normaalimuotoisella kiviaineksella ero oli keskimäärin 0,5 %-yksikköä (0,4 - 0,7 %). Mikäli verrataan jälleen optimaalisen kubisoinnin eli litteyslunun pienentämisen 20 %:sta 5 %:iin vaikutusta, kubisoinnilla voidaan vähentää sideaineen määrää keskimäärin 0,5 %-yksikköä (0,3 - 0,7 %).

Kiviaineksen kubisointi aiheuttaa tuotteelle lisähintaa 3 - 5 markkaa / tn yhden murskausvaiheen lisäyksen ja tuotteen vähäisemmän saannin vuoksi. Koska kiviaineksen muotoarvon paraneminen vähentää päällysteen sideainepitoisuutta, kubisointi ei välttämättä lisää kustannuksia, vaan jopa tuosäästöä. Esimerkiksi sideainepitoisuuden 0,5 %-yksikön lasku vähentää sideaineen tarvetta päällystetonnin kohti 5 kg, mikä merkitsee säästöä noin 4 mk / tn (bitumi noin 800 mk / tn). Koska kubisoinnin lisäkustannukset ja vähäisempi sideainetarve jokseenkin kumoavat toistensa vaikutuksen, kubisointi on useissa tapauksissa päällysteen kestoajan paranemisen vuoksi vuosikustannuksiltaan kannattavaa.

Jotta kiviaineksen muotoarvon vaikutus voitaisiin kuulamylyarvon lisäksi ottaa huomioon kokonaisvaltaisesti päällysteen kestoikämallintamisessa, tulisi selvittää raemuodon vaikutus päällysteen deformaatioherkkyyteen ja saada lisätietoa erityyppisten kivien vaikutuksesta kulumiskestävyyteen. Helpoiten ja luotettavimmin kiviaineksen raemuodon optimoinnin voisi selvittää minikoetien avulla, jolloin päällystelaatat tulisi deformaation selvittämiseksi asentaa tiehen joko poikittain tai rinnakkain. VTT:ssä on alkanut selvitystyö tällaisten minikoeteiden rakentamistekniikan selvittämiseksi.

Kaikki edellä mainitut johtopäätökset koskevat yksinomaan SMA-päällystettyä. Teiskon ja Varpaisjärven kivillä maksimiraekoko oli 18 mm ja Inkoon ja Kosken kivillä 20 mm. AB-päällysteessä kiviaineksen raemuodon vaikutus päällysteen kulumiseen voi olla erilaista.



## 9 KIRJALLISUUS

- /1/ Apilo, Laura; Katupäällystetutkimukset 1995 - 1996 - Koekohteet, ennakkotutkimukset ja seuranta. Katurakenteet ja -päällysteet-tutkimusohjelma. VTT Yhdyskuntatekniikka & Suomen kuntaliitto. Espoo 1996. 46 s. + liitt.
- /2/ Apilo, Laura; Katupäällystetutkimukset 1997 - Koekohteet, ennakkotutkimukset ja seuranta. Katurakenteet ja -päällysteet-tutkimusohjelma. VTT Yhdyskuntatekniikka, Suomen kuntaliitto & Ympäristöministeriö. Espoo 1997. 29 s. + liitt.
- /3/ Vuorinen, Jarmo; Minikoetie - Uusi menetelmä päällysteiden urautumistutkimuksiin. Asfaltti 60 / 1997. 2 s.
- /4/ Vuorinen, Jarmo; Minikoetie - Uusi menetelmä päällystetutkimuksiin. Tie ja liikenne 11 / 1997. 2 s.
- /5/ Vuorinen, Jarmo; Kiviaineksen raemuodon vaikutus päällysteen kulumiskestävyyteen ja työstettävyyteen. Päällystekurssit 1998, Asfalttiliitto ry. 12 s.
- /6/ Alkio, Risto; Vuorinen, Jarmo; Kiviaineksen raemuodon vaikutus päällysteen kulumiskestävyyteen - Minikoetien ensimmäisen talven tulokset. Helsinki 1996. Tielaitos, kehittämiskeskus, Tielaitoksen selvityksiä 57/1996, 26 s., + liitt. ISSN 0788-3722, ISBN 951-726-273-6, TIEL 3200425.
- /7/ Alkio, Risto; Kurki, Timo; Vuorinen, Jarmo; Kiviaineksen raemuodon vaikutus päällysteen kulumiskestävyyteen - Minikoetien talvien 1995 - 1996 ja 1996 - 1997 tulokset. Helsinki 1997. Tielaitos, kehittämiskeskus, Tielaitoksen selvityksiä 34/1997, 28 s., + liitt. ISSN 0788-3722, ISBN 951-726-366-X, TIEL 3200480.
- /8/ Vuorinen, Jarmo; Kiviaineksen raemuodon vaikutus päällystekiviaineksen kulumiskestävyyteen. Minikoetietutkimus Lohja Rudus Oy:n kiviaineksilla. VTT Yhdyskuntatekniikka, Tutkimusraportti 353. Espoo 1996. 19 s. + liitt.
- /9/ Kurki, Timo; Asfalttipäällysteiden urautumisen mallintaminen. ASTO-koeteiden tulosten 1990 - 1997 analysointi. Tielaitos, Tiehallinto, Tie- ja liikennetekniikka, Tielaitoksen selvityksiä 13/1998, 48 s. + liitt. ISSN 951-726-419-4, ISBN 0788-3722, TIEL 3200504.

Minikoetien päällystelaattojen talven 1995 - 1996 aikana tapahtunut kuluminen viiden profiilin (1 - 5) yksittäisarvoina ja keskiarvona (KA) / laatta. KH = keskihajonta. Kaikki kiviainekset.

KIVI	MUOTO	KULUMINEN (mm) PROFIILEITTAIN						
		KA	KH	1	2	3	4	5
Varpaisj.	Hyvä	1,94	0,26	1,7	2,1	2,1	1,6	2,2
Varpaisj.	Norm.	2,08	0,27	2,0	2,4	1,8	1,9	2,3
Varpaisj.	Huono	2,77	0,30	2,2	3,0	2,9	2,9	2,9
Teisko / referenssi		2,73	0,29	2,3	2,7	2,6	3,1	2,9
Teisko	Hyvä	2,95	0,23	3,1	2,9	2,7	2,8	3,3
Teisko	Norm.	2,95	0,42	2,3	3,4	3,1	3,1	2,7
Teisko	Huono	3,36	0,40	2,7	3,7	3,6	3,6	3,2
Varpaisj.	Hyvä	2,06	0,18	1,9	2,3	2,1	2,0	1,9
Varpaisj.	Norm.	2,01	0,14	2,0	1,8	2,0	2,1	2,2
Varpaisj.	Huono	2,37	0,62	3,2	2,6	2,2	1,6	2,1
Teisko / referenssi		3,20	0,27	2,8	3,5	3,2	3,4	3,1
Teisko	Hyvä	2,55	0,32	2,1	2,9	2,6	2,8	2,4
Teisko	Norm.	3,07	0,46	2,3	3,4	3,0	3,5	3,2
Teisko	Huono	3,79	0,55	3,9	4,7	3,7	3,3	3,4
Koski	Hyvä	1,75	0,28	2,2	1,7	1,6	1,6	1,7
Koski	Norm.	1,94	0,16	1,8	2,2	2,0	1,9	1,8
Koski	Huono	2,01	0,46	1,4	1,8	2,7	2,2	1,9
Teisko / referenssi		2,92	0,25	2,6	3,0	3,2	3,0	2,9
Inkoo	Hyvä	2,60	0,23	2,5	3,0	2,4	2,5	2,7
Inkoo	Norm.	2,59	0,19	2,4	2,8	2,6	2,7	2,4
Inkoo	Huono	3,25	0,43	2,6	3,7	3,3	3,1	3,6
Koski	Hyvä	1,98	0,23	1,7	2,0	1,7	2,2	2,2
Koski	Norm.	2,09	0,12	2,1	2,1	1,9	2,2	2,1
Koski	Huono	2,35	0,22	2,4	2,6	2,1	2,5	2,1
Teisko / referenssi		2,96	0,26	2,6	2,9	3,2	2,9	3,2
Inkoo	Hyvä	2,52	0,30	2,2	3,0	2,6	2,5	2,3
Inkoo	Norm.	2,69	0,10	2,6	-	2,6	-	2,8
Inkoo	Huono	3,18	0,27	3,4	3,1	3,5	2,8	3,1

Minikoetien päällystelaattojen talven 1996 - 1997 aikana tapahtunut kuluminen viiden profiilin (1 - 5) yksittäisarvoina ja keskiarvona (KA) / laatta. KH = keskihajonta. Teiskon ja Varpaisjärven kiviainekset.

KIVI	MUOTO	KULUMINEN (mm) PROFIILEITTAIN						
		KA	KH	1	2	3	4	5
Varpaisj.	Hyvä	3,26	0,23	3,3	3,0	3,0	3,4	3,5
Varpaisj.	Norm.	3,75	0,18	3,5	4,0	3,9	3,6	3,8
Varpaisj.	Huono	4,88	0,57	5,5	4,3	5,5	4,5	4,6
Teisko / referenssi		5,20	0,36	5,0	5,0	5,3	5,0	5,8
Teisko	Hyvä	5,75	0,57	5,4	6,2	6,5	5,3	5,3
Teisko	Norm.	5,84	0,60	6,3	5,2	6,6	5,3	5,7
Teisko	Huono	6,33	0,91	7,0	5,3	7,5	6,0	5,8
Varpaisj.	Hyvä	3,72	0,89	4,8	3,0	4,6	3,1	3,0
Varpaisj.	Norm.	3,59	0,26	3,2	3,4	3,8	3,7	3,9
Varpaisj.	Huono	5,03	0,72	5,0	6,2	5,0	4,4	4,5
Teisko / referenssi		6,09	0,68	6,3	5,4	7,1	5,7	6,0
Teisko	Hyvä	5,56	0,70	4,8	5,8	6,6	5,1	5,5
Teisko	Norm.	6,22	0,60	6,0	5,4	7,0	6,5	6,2
Teisko	Huono	6,22	0,67	6,9	5,5	6,9	5,7	6,1

Minikoetien päällystelaattojen talven 1997 - 1998 aikana tapahtunut kuluminen viiden profiilin (1 - 5) yksittäisarvoina ja keskiarvona (KA) / laatta. KH = keskihajonta. Teiskon ja Varpaisjärven kiviainekset.

KIVI	MUOTO	KULUMINEN (mm) PROFIILEITTAIN						
		KA	KH	1	2	3	4	5
Varpaisj.	Hyvä	3,83	0,30	4,2	3,4	3,7	4,0	3,8
Varpaisj.	Norm.	4,39	0,28	4,7	4,3	4,7	4,2	4,2
Varpaisj.	Huono	5,43	0,61	6,1	4,9	5,7	5,8	4,7
Teisko / referenssi		6,24	0,48	6,8	5,6	6,4	6,5	5,9
Teisko	Hyvä	6,54	0,78	7,0	5,4	6,9	7,3	6,0
Teisko	Norm.	6,64	0,53	7,3	6,2	6,4	7,2	6,2
Teisko	Huono	7,06	0,78	7,2	7,7	6,3	7,9	6,2
Varpaisj.	Hyvä	4,45	0,84	5,3	4,1	5,0	-	3,5
Varpaisj.	Norm.	4,19	0,32	4,5	3,8	4,5	4,3	3,9
Varpaisj.	Huono	5,78	1,03	6,9	5,6	6,8	4,8	4,8
Teisko / referenssi		6,90	0,91	6,9	6,2	7,0	8,3	6,1
Teisko	Hyvä	6,68	0,90	7,5	5,5	6,8	7,6	6,1
Teisko	Norm.	7,27	1,12	7,4	6,3	7,0	9,1	6,5
Teisko	Huono	6,48	0,91	6,8	5,6	6,9	7,6	5,6



Minikoetien päällystelaattojen talvien 1995 - 1996 ja 1996 - 1997 aikana tapahtunut yhteenlaskettu kuluminen viiden profiilin (1 - 5) yksittäisarvoina ja keskiarvona (KA) / laatta. KH = keskihajonta. Teiskon ja Varpaisjärven kiviainekset.

KIVI	MUOTO	KULUMINEN (mm) PROFIILEITTAIN					
		KA	1	2	3	4	5
Varpaisj.	Hyvä	5,2	5,0	5,1	5,1	5,0	5,7
Varpaisj.	Norm.	5,8	5,5	6,4	5,6	5,5	6,1
Varpaisj.	Huono	7,7	7,7	7,3	8,4	7,3	7,5
Teisko / referenssi		7,9	7,3	7,7	7,9	8,1	8,6
Teisko	Hyvä	8,7	8,5	9,1	9,2	8,1	8,6
Teisko	Norm.	8,8	8,7	8,6	9,7	8,5	8,5
Teisko	Huono	9,7	9,8	9,0	11,1	9,6	9,0
Varpaisj.	Hyvä	5,8	6,7	5,4	6,7	5,2	4,9
Varpaisj.	Norm.	5,6	5,2	5,2	5,8	5,7	6,0
Varpaisj.	Huono	7,4	8,3	8,9	7,2	6,0	6,6
Teisko / referenssi		9,3	9,0	8,9	10,4	9,0	9,1
Teisko	Hyvä	8,1	6,9	8,7	9,2	7,9	8,0
Teisko	Norm.	9,3	8,3	8,8	10,0	10,0	9,4
Teisko	Huono	10,0	10,8	10,2	10,6	9,0	9,5

# LIITE 1/4

Minikoetien päällystelaattojen talvien 1995 - 1996, 1996 - 1997 ja 1997 - 1998 aikana tapahtunut yhteenlaskettu kuluminen viiden profiilin keskiarvona (KA) / laatta. KH = keskihajonta. Kaikki kiviainekset.

KIVI	MUOTO	KULUMINEN (mm)
Varpaisj.	Hyvä	9,03
Varpaisj.	Norm.	10,22
Varpaisj.	Huono	13,08
Teisko / referenssi		14,17
Teisko	Hyvä	15,24
Teisko	Norm.	15,43
Teisko	Huono	16,75
Varpaisj.	Hyvä	10,23
Varpaisj.	Norm.	9,79
Varpaisj.	Huono	13,18
Teisko / referenssi		16,19
Teisko	Hyvä	14,79
Teisko	Norm.	16,57
Teisko	Huono	16,49
Koski	Hyvä	7,28
Koski	Norm.	8,40
Koski	Huono	8,80
Teisko / referenssi		14,08
Inkoo	Hyvä	12,99
Inkoo	Norm.	12,37
Inkoo	Huono	15,72
Koski	Hyvä	8,10
Koski	Norm.	8,91
Koski	Huono	11,48
Teisko / referenssi		15,85
Inkoo	Hyvä	12,95
Inkoo	Norm.	13,51
Inkoo	Huono	12,64

## **Ympäristö/vaikutukset**

- TIEL 3200519 Yleisten teiden ympäristön tila. Kaupunkiseutujen pääväylät. Tilaselvitysten yhteenveto (TS 27/1998)
- TIEL 3200528 Moottoritien vaikutus Salminlahden linnustoon (TS 36/1998)
- TIEL 4000185 Tielaitoksen ympäristön toimenpideohjelman 1997 - 2000 tarkistaminen. Tarkistamistarvetta koskevat kommentit (SJ 21/1998)
- Liikenne- ja autokantaennuste 1995-2020 - Ennusteen seuranta 1998 (SJ 22/1998)

## **Tietekniikka**

- TIEL 3200480 Kiviaineksen raemuodon vaikutus päällysteen kulutuskestävyyteen (TS 34/1997)
- TIEL 3200483 Kalkkikivijauheen laadun vaikutus asfalttipäällysteen ominaisuuksiin (TS 37/1997)
- TIEL 3200497 PAB-V-päällysteiden suunnittelu (TS 49/1997)
- TIEL 3200504 Asfalttipäällysteiden urautumisen mallintaminen. ASTO-koeteiden tulosten 1990 - 97 analysointi (TS 13/1998)
- TIEL 3200508 Hematiittifilleri SMA-päällysteessä. Työolosuhte- ja ympäristövaikutukset (TS 17/1998)

Hydraulisilla sideaineilla sidottujen materiaalien laadunvarmistus:

- TIEL 3200514 osa 1. Sementillä sidotut materiaalit - Kirjallisuusselvitys (TS 23/1998)
- TIEL 3200515 osa 2. Sementillä sidottujen materiaalien jäätymis-sulamiskestävyyden (TS 24/1998)
- TIEL 3200516 osa 3. Koekappaleiden valmistuksen ja säilytyksen vaikutus sementillä sidotun materiaalin lujuuteen (TS 25/1998)
- TIEL 3200520 Geotekniikan informaatiojulkaisuja: Teiden pehmeikkötutkimukset (TS 28/1998)
- TIEL 3200527 Muovibitumikokeilut 1997 (TS 35/1998)
- TIEL 3200529 Kiviaineksen raemuodon vaikutus SMA-päällysteen kulumiskestävyyteen. Loppuraportti Vt 1:n minikoeteiden tutkimuksista (TS 37/1998)
- TIEL 3200531 Liikennemerkkien tukien taipumaluokat prEN 12899-1 mukaan. Yleistä projektista - Tyypisarjojen tukien rakennesuunnittelun tarkistus - Uudet taipumaluokat (TS 39/1998)
- TIEL 4000192 Tien kantavan kerroksen suunnitteluratkaisun valinta (SJ 35/1998)



## Tie- ja liikennetekniikka -yksikön julkaisuja vuodelta 1998

### OHJEET JALAA TUVAATIMUKSET

TIEL 2110013	Maaston ja kallon muotoilu - Maisemaohje
TIEL 2130016	Kevyen liikenteen suunnittelu
TIEL 2140009	Teiden suunnittelu V. Tiehen kuuluvat laitteet 5. Reunatuot
TIEL 2140010	Taajamapäälysteet ja reunatuot
TIEL 2140011	Päälysteiden suunnittelu.
TIEL 2140013	Teiden suunnittelu V. Tiehen kuuluvat laitteet 3. Meluesteet
TIEL 2140014	Teiden suunnittelu V. Tiehen kuuluvat laitteet 4. Aidat
TIEL 2150002-98	Ympäristötieto ja tietolähteet tiensuunnittelussa
TIEL 2150003-98	Vihertöiden toteuttaminen tieympäristössä
TIEL 2180003	Tiesuunnitelman pohjatutkimukset
TIEL 2210010-98	TYLT: Kovat pintaverhoustyöt, sadevesikourut, reunatuot ja sorapinta
TIEL 2212400-98	TYLT: Viherrakenteet
TIEL 2212802-98	TYLT: Päälystystyöt
TIEL 2230018-98	Teiden talvihoito - Laadun määrittely 1998
TIEL 2243560-98	Päälystystöiden yleiset arvonmuutosperusteet

### SELVITYKSIÄ (=TS) JA SISÄISIÄ JULKAISUJA (=SJ):

#### Liikennetekniikka

TIEL 3200473	Tavallisen ja leveäkaistaisen moottoriliikennetien liikennevirran ominaisuudet - Vt 12 Lahti - Uusikylä (TS 26/1997)
TIEL 3200486	Kevyen liikenteen arkkitehtuuri (TS 41/1997)
TIEL 3200487	Ohituskajstojen turvallisuus (TS 3/1998)
TIEL 3200489	Liikenneturvallisuustarkastus. - Länsiväylä Paasikiventie - Kekkosen tie - Teiskontie (TS 2/1998)
TIEL 3200490	Linja-autoliikenne: Linja-autoliikenteen palvelusotekijät (TS 42/1997)
TIEL 3200491	Linja-autoliikenne: Esimerkkejä linja-autopysäkeistä ja etuisuusjärjestelyistä (TS 43/1997)
TIEL 3200492	Linja-autoliikenne: Liityntä- ja saattoliikennejärjestelyt (TS 44/1997)
TIEL 3200493	Kevyen liikenteen alikulkujen turvallisuus ja sujuvuus (TS 45/1997)
TIEL 3200494	Pyöräilijöiden liittymäonnettomuustyyppit ja liittymien ominaisuudet (TS 46/1997)
TIEL 3200495	Linja-autoliikenne: Liikkumisesteisten huomioon ottaminen pysäkkien suunnittelussa (TS 47/1997)
TIEL 3200526	S 12 Pääteiden parantamisratkaisut: Uusien tiettyypivaihtoehtojen vertailu. Vt 5 välillä Vehmasmäki-Hiitulanlahti (TS 34/1998)
TIEL 4000181	S 12 Pääteiden parantamisratkaisut: Laajennetun T-liittymän välityskyky (SJ 2/1998)
TIEL 4000182	S 12 Pääteiden parantamisratkaisut: Välityskyky- ja palvelusotatarkastelujen tutkimussuunnitelma (SJ 3/1998)
TIEL 4000186	Tasoliittymät - Turvasaarekkeella varustetun liittymän suunnittelu (SJ 23/1998)
TIEL 4000187	Kevyen liikenteen verkon tarveselvitys (SJ 24/1998)
TIEL 4000188	Vapaa tila ja suojaetäisyys - Selvitys kehittämistarpeesta (SJ 6/1998)